

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

2023

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)
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)
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

2023

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)
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)
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

- Л.В. Ветчинникова, А.Ф. Титов, Е.Э. Костина, А.В. Жигунов.* Сибсовое потомство карельской березы на Заонежской лесосеменной плантации.... 9
- А.В. Козыкин, Е.Н. Наквасина.* ГИС-анализ влияния типа землепользования на современное разнообразие лесонасаждений в национальном парке «Кенозерский»..... 27
- Е.В. Робонен, Н.П. Чернобровкина, А.В. Егорова, М.И. Зайцева, К.Г. Нелаева.* Морфометрические критерии оценки качества контейнерных семян хвойных пород..... 42
- А.Б. Егоров, Л.Н. Павлюченкова, А.М. Постников, А.А. Бубнов.* Выращивание березы на вырубках с применением гербицидов..... 58
- А.П. Царев, Р.П. Царева, В.А. Царев, П.М. Евлаков.* Биоэнергетические и репродукционные насаждения настоящих тополей в Центральном Черноземье России..... 75
- Z. Govedar, N. Prokhorova, V. Babić, V. Dukić, B. Kanjevac, S. Bilić.* Natural Regeneration on Deadwood in the Primeval Forest Janj..... 90
- Е.А. Сурина, Н.С. Минин.* Эффективность рубок ухода в лиственно-еловых насаждениях в северной подзоне европейской части России..... 103

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- Ф.В. Свойкин, В.Ф. Свойкин, В.А. Соколова, С.А. Войнаш, С.Е. Арико.* Применение канатно-рельсовых дорог для трелевки сортиментов..... 115
- Е.Г. Хитров, И.С. Должиков, А.С. Дмитриев, В.А. Каляшов, И.В. Григорьев, О.И. Григорьева.* Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом..... 126

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- В.Ю. Чернов, Е.С. Шаранов, И.Г. Гайсин.* Оценка точности метода измерения сопротивления сверлению древесины в дендрохронологических исследованиях..... 135

- С.Г. Елисейев, В.Н. Ермолин, Д.В. Дук.* Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*)..... 151

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

- Ю.А. Сыпалова, С.Л. Шестаков, А.Ю. Кожевников.* Функциональный состав и структурные особенности лигнинов высших растений..... 164
- Д.Н. Жирнов, Е.В. Дернова, В.В. Гораздова, Д.А. Дулькин.* Зольность тарного картона. Проблемы и пути их решения..... 184

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Д.Н. Клевцов, О.Н. Тюкавина.* Запасы углерода в 40-летних культурах сосны обыкновенной..... 195
- О.И. Гаврилова, К.В. Гостев.* Применение обработанной плазмой воды для подготовки семян хвойных пород к посеву..... 204
-



CONTENTS

FORESTRY

- L.V. Vetchinnikova, A.F. Titov, E.E. Kostina, A.V. Zhigunov.* Sibs Progeny of Curly Birch at the Zaonezhye Forest Seed Orchard..... 9
- A.V. Kozykin, E.N. Nakvasina.* GIS-analysis of the Influence of the Land Use Type on the Current Diversity of Forest Plantations in the Kenozersky National Park..... 27
- E.V. Robonen, N.P. Chernobrovkina, A.V. Egorova, M.I. Zaitseva, K.G. Nelaeva.* Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality..... 42
- A.B. Egorov, L.N. Pavluchenkova, A.M. Postnikov, A.A. Bubnov.* Growing Birch in Clear-cut Areas with Herbicide Application..... 58
- A.P. Tsarev, R.P. Tsareva, V.A. Tsarev, P.M. Evlakov.* Bioenergetic and Reproductive Plantations of True Poplars Species in the Central Black Earth Region of Russia..... 75
- Z. Govedar, N. Prokhorova, V. Babić, V. Dukić, B. Kanjevac, S. Bilić.* Natural Regeneration on Deadwood in the Primeval Forest Janj..... 90
- E.A. Surina, N.S. Minin.* Efficiency of Thinning in Deciduous-Spruce Forest Stands in the Northern Taiga Forest Region of the European Part of the Russian Federation..... 103

LOGGING TECHNOLOGIES

- F.V. Svoykin, V.F. Svoykin, V.A. Sokolova, S.A. Voinash, S.Ye. Ariko.* Application of Cable-Railways for Timber Skidding..... 115
- E.G. Khitrov, I.S. Dolzhikov, A.S. Dmitriev, V.A. Kalyashov, I.V. Grigorev, O.I. Grigoreva.* Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil..... 126

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- V.Yu. Chernov, E.S. Sharapov, I.G. Gaisin.* Evaluation of the Accuracy of Wood Drilling Resistance Measurement Method in Dendrochronological Studies 135

- S.G. Eliseev, V.N. Ermolin, D.V. Duk.* Using Laser Perforation to Enhance Decorative Properties of Siberian Fir (*Abies sibirica*) Wood..... 151

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

- Yu.A. Sypalova, S.L. Shestakov, A.Yu. Kozhevnikov.* Functional Composition and Structural Features of Higher Plant Lignins..... 164

- D.N. Zhirnov, E.V. Dernova, V.V. Gorazdova, D.A. Dulkan.* Ash Content of Containerboard. Problems and Solutions..... 184

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- D.N. Klevtsov, O.N. Tyukavina.* Carbon Stocks in 40-year Scots Pine Crops..... 195

- O.I. Gavrilova, K.V. Gostev.* Use of Plasma-treated Water to Prepare Seeds of Coniferous Species for Sowing..... 204
-



Научная статья

УДК 582.632.1:630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-9-26

Сибсовое потомство карельской березы на Заонежской лесосеменной плантации

Л.В. Ветчинникова^{1,3} ✉, *д-р биол. наук, гл. науч. сотр.*; *ResearcherID: J-5665-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2091-905X>

А.Ф. Титов^{2,3}, *чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, проф., гл. науч. сотр.*;

ResearcherID: A-6705-2014, *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-2411>*

*Е.Э. Костина*¹, *мл. науч. сотр.*; *ResearcherID: AEW-2779-2022*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1115-9853>

*А.В. Жигунов*³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: AAK-8124-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8707-7526>

¹Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; vetchin@krc.karelia.ru ✉, kostina@krc.karelia.ru

²Институт биологии Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; titov@krc.karelia.ru

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194024; a.zhigunov@bk.ru

Поступила в редакцию 03.02.23 / Одобрена после рецензирования 05.03.23 / Принята к печати 10.03.23

Аннотация. Представлены результаты изучения роста и развития разновозрастных (35 и 15 лет) деревьев, являющихся сибсовым потомством карельской березы, полученным в результате контролируемого опыления. Исследованные деревья растут на Заонежской лесосеменной плантации (участки № 1 и 2 соответственно), в юго-восточной части Карелии, на территории Медвежьегорского района. Показано, что на участке № 1 в семенном потомстве карельской березы к 20 годам количество растений с признаками узорчатой текстуры в древесине составило 67 %, а к 35 – почти 80 %. Предположительно, это обусловлено, с одной стороны, генетическими особенностями исходных (плюсовых) родительских деревьев, а с другой – благоприятными условиями, которые сложились на территории лесосеменной плантации в 1-е годы развития сибсового потомства. На примере 4 из 36 гибридных семей (отобранных с учетом наличия прямого и обратного скрещиваний) изучены особенности роста и развития разновозрастных насаждений. Обнаружено, что в сибсовом потомстве гибридных семей доминировали деревья высокоствольной формы роста, при этом в насаждении на участке № 1 (35 лет) преобладали деревья с мелкобугорчатым типом поверхности ствола, на участке № 2 (15 лет) – с шаровидноутолщенным. С возрастом скорость линейного роста у деревьев существенно снижалась, а радиального, наоборот, увеличивалась. Однако с повышением толщины коры происходило «сглаживание» ранее выпуклой поверхности ствола. Помимо этого, выявлены особенности живого напочвенного

покрова, сформировавшегося под влиянием разновозрастных (35 и 15 лет) насаждений карельской березы. На основании проведенных исследований сделан вывод, что при целевом выращивании карельской березы с узорчатой текстурой древесины (например, для производства строганного шпона) можно получить хорошие результаты уже при достижении деревьями возраста 20–35 лет. Кроме того, созданная лесосеменная плантация, учитывая количество представленных на ней деревьев и их происхождение, является важной частью ценного генофонда карельской березы, который в дальнейшем может стать основой для расширенного воспроизводства ресурсов этого уникального представителя европейской лесной дендрофлоры.

Ключевые слова: карельская береза, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, лесосеменная плантация, сибсовое потомство, рост березы, развитие березы, формовое разнообразие березы

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-16-00096 «Выявление генетических факторов, контролирующих признак “узорчатости древесины” у карельской березы с использованием высокопроизводительного генотипирования»). Авторы благодарят М.Л. Щурову за предоставление проектной документации по созданию Заонежской лесосеменной плантации и участие в проведении натурного обследования насаждений карельской березы в 2006 и 2022 гг., а также О.С. Серебрякову и Н.Е. Петрову за участие в экспедиции и помощь в сборе полевых материалов в 2022 г.

Для цитирования: Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Костина Е.Э., Жигунов А.В. Сибсовое потомство карельской березы на Заонежской лесосеменной плантации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 9–26. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-9-26>

Original article

Sibs Progeny of Curly Birch at the Zaonezhye Forest Seed Orchard

Lidia V. Vetchinnikova^{1,3}✉, Doctor of Biology, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-5665-2018](https://orcid.org/0000-0003-2091-905X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2091-905X>

Alexander F. Titov^{2,3}, Corresp. Member of RAS, Doctor of Biology, Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: [A-6705-2014](https://orcid.org/0000-0001-6880-2411), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-2411>

*Ekaterina E. Kostina*¹, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AEW-2779-2022](https://orcid.org/0000-0003-1115-9853),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1115-9853>

*Anatolii V. Zhigunov*³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAK-8124-2020](https://orcid.org/0000-0001-8707-7526),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8707-7526>

¹Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; vetchin@krc.karelia.ru✉, kostina@krs.karelia.ru

²Institute of Biology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; titov@krc.karelia.ru

³St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutsky per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; a.zhigunov@bk.ru

Received on February 3, 2023 / Approved after reviewing on March 5, 2023 / Accepted on March 10, 2023

Abstract. The article reports the results of studies on the growth and development of curly birch sibs progeny (produced through controlled pollination) aged 35 and 15 years growing in the Zaonezhye forest seed orchard (sites 1 and 2, respectively) in south-eastern Karelia,



Medvezhyegorsky District. The number of trees with signs of wood figure in the seed progeny of curly birch in site 1 was 67 % by the age of 20 years, and by the age of 35 years – almost 80 %. This can probably be attributed to the genetic characteristics of the parent (plus) trees on one hand and to the favorable conditions in the forest seed orchard during the first years of the sibs progeny development on the other. Four of the 36 hybrid families (selected to include forward- and backcrossing products) were used for the case study of the growth and development patterns in stands of different age. The sibs progeny of these hybrid families was dominated by high-stemmed plants, but the main trunk shape in the 15-year-old stand was one with necks and muffs, while in the 35-year-old stand – with small protuberances. The rate of height growth in the trees decreased notably with age, whereas radial (stem diameter) growth, on the contrary, accelerated. As the bark grew thicker, however, the formerly bulgy surface “smoothed down”. We have also identified specific features of the ground vegetation formed under the effect of curly birch plantations of different age (15- and 35 years old). A conclusion drawn from the study is that good results from targeted cultivation of curly birch with figured grain (e.g., for sliced veneer) can be achieved already by the age of 20–35 years. Furthermore, considering the number of trees and their origin, this forest seed orchard constitutes an essential part of the valuable gene pool of curly birch, which may turn into a source for expanded reproduction of the resources of this unique member of the European forest tree flora.

Keywords: curly birch, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, forest seed orchard, sibs progeny, birch growth, birch development, birch shape diversity

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support from the Russian Science Foundation (project № 22-16-00096 “Identification of genetic factors controlling the wood pattering trait in curly birch using high-throughput genotyping”). The authors would like to thank M.L. Shchurova for providing project documentation for the establishment of the Zaonezhye forest seed orchard and participation in the field survey of curly birch plantations in 2006 and 2022, as well as O.S. Serebryakova and N.E. Petrova for participation in the expedition and assistance in collecting field materials in 2022.

For citation: Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kostina E.E., Zhigunov A.V. Sibs Progeny of Curly Birch at the Zaonezhye Forest Seed Orchard. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 9–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-9-26>

Введение

В первой половине XX в. в связи с актуализацией проблемы повышения продуктивности лесов широкое развитие получили селекционно-генетические исследования. Первоначально они были сосредоточены на изучении внутривидовой изменчивости лесообразующих пород и ограничивались выявлением наиболее интересных по тем или иным признакам форм деревьев, а затем на отборе наиболее ценных генотипов для создания искусственных насаждений с целью получения в течение длительного времени семян основных древесных пород с улучшенными наследственными свойствами.

В Карелии с начала создания объектов лесного семеноводства основное внимание уделялось главным лесообразующим породам – сосне и ели. Согласно официальным данным, на 01.01.2023 г. здесь отобраны и аттестованы плюсовые деревья (сосна – 1110 шт., ель – 323 шт.), плюсовые насаждения (сосна – 288,1 га, ель – 132,8 га), лесосеменные плантации (ЛСП) (сосна – 347,0 га, ель – 54,6 га), постоянные лесосеменные участки (ПЛСУ) (сосна – 13,4 га) и т. д. Кроме сосны и ели в структуре объектов лесного семеноводства Республики присутствует также уникальный представитель европейской лесной дендрофлоры – карельская береза *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti.

Сегодня ее природные популяции на территории региона по численности сравнительно невелики – около 1,5 тыс. деревьев, но являются наибольшими не только в России, но и в Северной Европе [3].

К настоящему времени в состав объектов лесного семеноводства Республики Карелии с участием карельской березы входят 14 плюсовых деревьев, архив клонов (0,4 га), Заонежская ЛСП (16,8 га), на которой представлено семенное (сибсовое) потомство, полученное в результате контролируемого опыления, и участок семенного (полусибсового) потомства, выращенного из семян от свободного опыления (площадью 6,9 га). В 2021 г. участок семенного (полусибсового) потомства из-за отсутствия необходимой информации о родительских деревьях переведен из категории ЛСП в ПЛСУ. Кроме этого в 2021 г. на территории Олонецкого центрального лесничества сотрудниками Института леса Карельского научного центра РАН совместно с работниками АУ РК «Кареллесхоз» при поддержке Министерства природных ресурсов и экологии Республики Карелии созданы первые в России популяционно-экологические культуры карельской березы (415 растений 43 генотипов), полученные путем клонального микроразмножения *in vitro* [8], общей площадью 1,4 га [4].

Оценка современного состояния объектов лесного семеноводства (включая ЛСП), созданных на территории Республики Карелии, дается многими авторами [10, 12, 14, 16–18, 23], но большинство работ посвящены хвойным породам. В отношении карельской березы исследования почти не проводились, хотя они представляют значительный интерес, не только практический, но и научный.

Цель – изучение формового разнообразия и состояния произрастающих в условиях ЛСП в юго-восточной части Карелии, на территории Медвежьегорского района, сибсовых потомств (35 и 15 лет) карельской березы, полученных в результате контролируемого опыления.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служило сибсовое потомство карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, полученное путем контролируемого опыления. Деревья произрастают на Заонежской ЛСП I порядка, расположенной в юго-восточной части Карелии [15], в Медвежьегорском районе. По характеру древостоев и почвенно-геологическим особенностям район соответствует природным условиям, свойственным значительной части южной Карелии. Аборигенным компонентом дендрофлоры является карельская береза.

Согласно проектной документации создания Заонежской ЛСП и полученным в ходе исследований данным о представленном здесь семенном потомстве карельской березы, сибсовое потомство располагается на 2 участках (поле № 2 и 10) [15], которые для удобства обозначены нами в тексте как № 1 и 2. Участок № 1, площадью 4,8 га, создан в 1987 г., участок № 2, площадью 7,0 га, – в 2006 г. Согласно паспорту ЛСП, на участках № 1 и 2 было высажено около 1,5 тыс. (от 20 вариантов скрещивания) и около 3,0 тыс. (от 16 вариантов скрещивания) растений соответственно. Почва на участке № 1 – дерново-среднеподзолистая, а на участке № 2 – среднеподзолистая

супесчаная. Растения расположены рядами с размещением на площади 5×8 м (в ряду и между рядами соответственно) по 2 шт. в одно посадочное место с учетом, что позднее будут удалены деревья, у которых не проявятся косвенные признаки «узорчатости» древесины.

Родительские деревья сибсового потомства, представленного на ЛСП, имеют карельское происхождение и ранее были зарегистрированы в республиканском реестре плюсовых деревьев. О них есть информация, но сами деревья не сохранились или сохранились частично, поскольку в 90-е гг. подверглись незаконной рубке.

В 2006 г. на участке № 1 работниками Петрозаводской лесосеменной станции (с нашим участием) была проведена оценка формового разнообразия деревьев (в возрасте 20 лет) по форме роста и типу поверхности ствола (табл. 1). На участке № 2 такие работы ранее не осуществлялись.

В 2022 г. для изучения формового разнообразия сибсового потомства карельской березы в возрасте 35 (участок № 1) и 15 (участок № 2) лет в целях формирования выборки для его генетической оценки на ЛСП нами отобраны гибридные семьи: а) включающие потомство от прямого и обратного скрещивания конкретной родительской пары; б) имеющие максимально возможное количество растений в обоих вариантах скрещивания; в) характеризующиеся разнообразием по форме роста и типу поверхности ствола (в т. ч. без признаков узорчатости); г) для которых сохранились (хотя бы частично) родительские деревья. В результате среди сибсового потомства из 36 гибридных семей карельской березы указанным критериям соответствовали только 4. На участке № 1 это гибридные семьи карельской березы, полученные от прямого ♀133 × ♂134 (68 деревьев) и обратного ♀134 × ♂133 (20 деревьев) скрещиваний. На участке № 2 – гибридные семьи от прямого ♀51 × ♂58а (96 деревьев) и обратного ♀58а × ♂51 (15 деревьев) скрещиваний.

В ходе полевых работ у деревьев определяли форму роста: высоко-, короткоствольная, кустообразная или кустарниковая (рис. 1) – и тип поверхности ствола [3, 6]. При этом к высокоствольной форме относили деревья с хорошо выраженным стволом и высоко приподнятой кроной – от 1,5–2,0 м и более (рис. 1, а); к короткоствольной – деревья, у которых стволовая часть до 1,5 м, выше которой располагаются несколько мощно развитых скелетных ветвей, формирующих общую крону (рис. 1, б); к кустообразной – деревья с укороченным (от 10 см до 1 м), но явно выраженным стволом, несущим раскидистую крону (рис. 1, в). Среди древовидных форм отмечали также низкорослые растения кустарниковой формы, у которых мощно развитые скелетные ветви имели общий ствол в прикорневой части, отходящий от корневой шейки (рис. 1, г).

Высоту определяли с помощью высотомера Suunto PM-5/1520 РС или 1,8-метровой линейкой с точностью до 5 см (для деревьев с кустообразной формой роста), диаметр ствола – мерной вилкой с двух сторон дерева на высоте 1,3 м (для узорчатых деревьев высоко- и короткоствольной форм роста и без признаков узорчатости) или 0,5 м от шейки корня (у узорчатых деревьев кустообразной формы роста). Для оценки изменчивости показателей использовали коэффициент вариации (С, %) и шкалу уровней изменчивости, предложенную ранее для древесных растений [11].



Рис. 1. Формы роста карельской березы: высокоствольная (а), короткоствольная (б), кустообразная (в) и кустарниковая (г). Июнь 2022 г.

Fig. 1. Curly birch growth forms: high-stemmed (a), short-stemmed (b), shrub-like (в), shrubby (г). June, 2022

Геоботаническое описание участков проводили в 2022 г. по общепринятой методике, использованной нами ранее [5]. Для этого на обоих участках закладывали по 5 площадок размером 1×1 м. Названия видов и их принадлежность к аборигенной или адвентивной части флоры приведены в соответствии с «Конспектом флоры Карелии» [9]. Для характеристики видов, согласно сайту [13], использовали эколого-ценотическую оценку, предложенную М.Л. Раменской [19], и экологические шкалы Н. Ellenberg [26, 27], Е. Landolt [28] и Д.Н. Цыганова [24].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования показали, что спустя 20 лет после создания ЛСП на участке № 1 в sibсовом потомстве карельской березы у 66,6 % деревьев (от числа сохранившихся) присутствуют косвенные признаки узорчатости древесины (табл. 1). При этом в 3 из 20 гибридных семей количество узорчатых особей достигло 88 %, а еще в 1 – 84 %. Доля деревьев высокоствольной формы роста на участке № 1 к 2006 г. составила 24,4 %, короткоствольной – 27,9 %, а кустообразной – 14,3 %. Число деревьев с шаровидноутолщенным типом поверхности ствола (23,6 %) в среднем было немного больше по сравнению с мелкобугорчатым (22,1 %). Добавим, что в 1-е десятилетие после создания ЛСП часть деревьев (около 1/3) была удалена в ходе рубок ухода, поскольку посадка, как уже отмечено выше, проводилась по 2 дерева в 1 посадочное место. В результате утрачены не только безузорчатые деревья, но и часть узорчатых.

К 2022 г. на участке № 1 количество растений с признаками узорчатой текстуры в древесине составило почти 80 %. Количество сестринских растений в гибридных семьях варьировало от 5 до 120 деревьев.

Таблица 1

Характеристика (%) сибсового потомства карельской березы *Betula pendula* var. *carelica* на участке № 1 по форме роста и типу поверхности ствола, 2006 г.
 Characterization (%) of curly birch *Betula pendula* var. *carelica* sibs progeny in site № 1 by growth form and trunk surface type, 2006

Вариант скрещивания	Количество деревьев, сохранившихся в гибридных семьях	Форма роста			Тип поверхности ствола				Всего	
		в/ств	к/ств	кустообр.	ш/ут	м/буг	к/буг	ребр.	узорч.	б/пр
♀130 × ♂132	96	12	26	8	16	8	13	9	46	54
♀130 × ♂135	13	25	45	0	40	15	5	10	70	30
♀130 × ♂136	15	65	23		12	53	0	23	88	12
♀131 × ♂134	30	10	23	12	17	12	4	12	45	55
♀131 × ♂135	25	0		31	23	8	16	30	0	54
♀131 × ♂136	19	20	23	17	28	16		16	0	60
♀132 × ♂130	16	30	30	0	0	20	20	20		
♀132 × ♂131	124	9	31	12	14	5	25	8	52	48
♀132 × ♂133	98	23	16	27	30	25	11	0	66	34
♀132 × ♂134	97	25	32	20	31	37	8	1	77	23
♀132 × ♂136	93	28	20	9	20	12	16	9	57	43
♀133 × ♂130	50	8	31	24	22	18	15	8	63	37
♀133 × ♂131	53	30	12	30	12	24	18	17	71	29
♀133 × ♂134	87	22	33	33	22	40	24	2	88	12
♀133 × ♂135	100	21		21	28	21	17	9	75	25
♀133 × ♂136	32	19	37	9	39	10	13	3	65	35
♀134 × ♂131	21	33	43	11	15	51	5	16	87	13
♀134 × ♂133	20	7	30	22	36	18		0	59	41
♀134 × ♂135	51	50	26	8	32	31	17	4	84	16
♀134 × ♂136	7		13	0	50	13	0	0	63	37
Среднее	1047	24,4	27,9	14,3	23,6	22,1	13,0	7,8	66,6	33,4

Примечание: в/ств – высокоствольная; к/ств – короткоствольная; кустообр. – кустообразная; ш/ут – шаровидноутолщенная; м/буг – мелкобугорчатая; к/буг – крупнобугорчатая; ребр. – ребристая; узорч. – с признаками узорчатости; б/пр – без признаков узорчатости.

На участке № 2 через 15 лет после его создания количество растений в сибсовом потомстве также сократилось (примерно на 30 %) вследствие проведения уходов в 1-е пять лет. На 2022 г. здесь в зависимости от варианта скрещивания количество деревьев в гибридной семье варьирует от 40 до 1000 шт.

Важным компонентом нового биоценоза, сложившегося на ЛСП, является живой напочвенный покров, который сформировался под влиянием насаждений

карельской березы и, в свою очередь, оказывал существенное влияние на рост и развитие всех находящихся здесь деревьев. Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова к настоящему времени составило в среднем 70 %. На участках № 1 и 2 в целом зафиксировано 38 видов, из них 32 – сосудистые растения (преимущественно лесные), 4 – лишайники, 2 – мхи. Несмотря на значительное сходство состава напочвенного покрова, выявлены особенности каждого из участков. В частности, на территории участка № 1 обнаружено 28 видов сосудистых растений, а на территории участка № 2 – 19, среди которых в обоих случаях преобладает вереск обыкновенный, но с разной площадью проективного покрытия (20 и 40 % соответственно). Различия установлены также в соотношении эколого-ценотических групп в видовом составе сосудистых растений: в насаждении на участке № 1 в отличие от участка № 2 отмечены адвентивные виды и не отмечены болотные эу-мезотрофы (рис. 2).

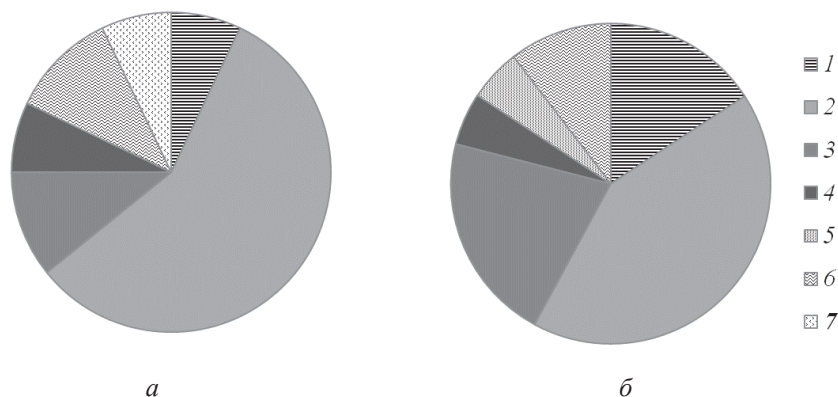


Рис. 2. Соотношение эколого-ценотических групп в видовом составе сосудистых растений живого напочвенного покрова (% от общего числа видов) в насаждениях карельской березы 35 (а) и 15 (б) лет (2022 г.): 1 – лесные эвтрофные мезо-гигрофиты сциофиты; 2 – лесные мезо-олиготрофные мезофиты сциофиты-семигелиофиты; 3 – лесные олиготрофные ксерофиты-гелиофиты; 4 – лесные виды с широкой экологической амплитудой; 5 – болотные эу-мезотрофы; 6 – луговые мезо-гигрофиты; 7 – адвентивные виды

Fig. 2. Proportions of ecological-coenotic groups in the species composition of vascular plants in the ground vegetation (% of the total number of species) in curly birch stands aged 35 years (a) and 15 years (b) (2022), where: 1 – forest-dwelling eutrophic meso-hygrophytic sciophyte; 2 – forest-dwelling meso-oligotrophic mesophytic sciophyte-semiheliophyte; 3 – forest-dwelling oligotrophic xerophytic heliophyte; 4 – forest-dwelling species with a wide ecological amplitude; 5 – meso-eutrophic mire species; 6 – meso-hygrophytic meadow species; 7 – non-native species

Сравнительный анализ сибсовых потомств карельской березы (на примере 4 гибридных семей, полученных в результате прямого и обратного скрещиваний), произрастающих в разновозрастных насаждениях (35 и 15 лет) на территории ЛСП, также выявил различия между группами потомств. В насаждении на участке № 1 большинство растений (54 %) в сибсовом потомстве изученных гибридных семей по форме роста оказались высокоствольными (рис. 3, а). Их высота в целом варьировала от 4,1 до 14,6 м (табл. 2) и почти не зависела от варианта скрещивания. Так, в гибридной семье ♀133 × ♂134 вы-

сота в среднем составила 9,2 м, а при обратном скрещивании ♀134 × ♂133 – 8,0 м (табл. 2). Широкая амплитуда изменчивости отмечена и в отношении диаметра ствола. В варианте скрещивания ♀133 × ♂134 его значения у высоко- и короткоствольных форм роста варьировали от 2,9 до 30,0 см (на высоте 1,3 м от корневой шейки) (табл. 2), а у кустообразных – от 21,4 до 33,8 см (на высоте 0,5 м от корневой шейки). В среднем диаметр ствола (на высоте 1,3 м) у изученных деревьев в 35-летнем насаждении составил около 15,0 см, при этом у 30 % он превысил 18,0 см. По характеру поверхности ствола здесь доминировал мелкобугорчатый тип (около 52 %) (рис. 3, б), у единичных особей просматривалась небольшая ребристость на стволах. Деревья без признаков узорчатости составили около 20 %.

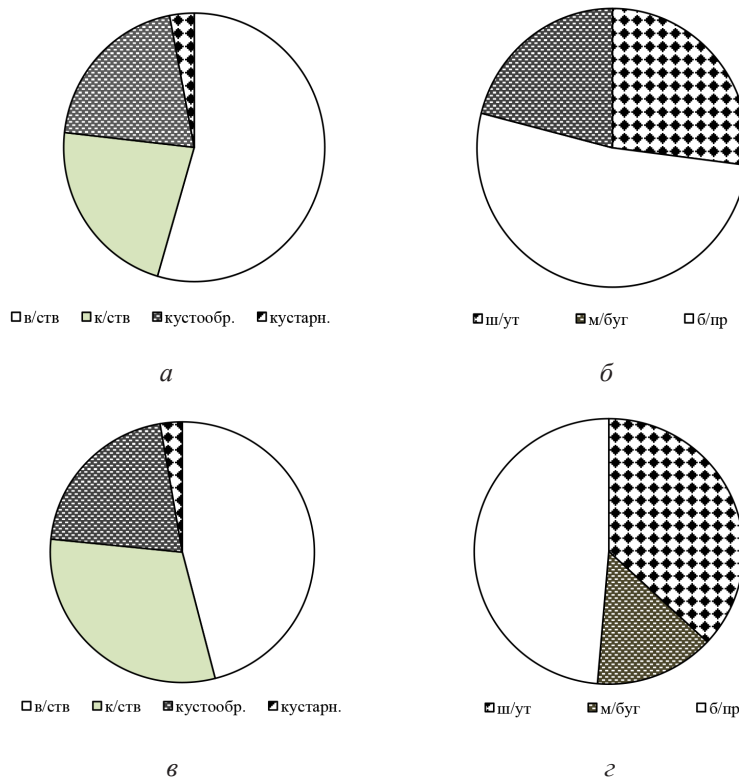


Рис. 3. Соотношение деревьев карельской березы (% от их общего числа) в изученных гибридных семьях на участках № 1 (а, б) и 2 (в, г) по форме роста (а, в) и типу поверхности ствола (б, г) к 2022 г. (здесь и на рис. 4: в/ств – высокоствольная; к/ств – короткоствольная; кустообр. – кустообразная; кустарн. – кустарниковая; ш/ут – шаровидноутолщенная; м/буг – мелкобугорчатая; б/пр – без признаков узорчатости; ребр. – ребристая)

Fig. 3. Proportions of curly birch trees (% of their total number) within the studied hybrid families growing in sites 1 (a, б) and 2 (в, г) by growth forms (a, в) and trunk shapes (б, г) to 2022. Here and in Fig. 4: в/ств – high-stemmed, к/ств – short-stemmed, кустообр. – shrub-like, кустарн. – shrubby; ш/ут – with necks and muffs, м/буг – with small protuberances, б/пр – without “figured grain”; ребр. – ribbed

Таблица 2

**Высота и диаметр деревьев сибсового потомства карельской березы
Betula pendula var. carelica в зависимости от варианта скрещивания
Height and diameter of curly birch sibs progeny trees depending on crossing variants**

Показатель	Участок № 1		Участок № 2	
	♀133 × ♂134	♀134 × ♂133	♀51 × ♂58a	♀58a × ♂51
<i>Высота</i>				
Число деревьев, шт.	68	20	96	15
Высота (<i>H</i>), $M \pm m$, м	9,2±2,51	8,0±1,93	5,0±2,40	4,9±2,76
Размах изменчивости, м	8,1–13,1	4,1–14,6	1,6–10,6	1,2–9,6
Коэффициент вариации, %	24,0	27,3	47,8	56,7
<i>Диаметр</i>				
Число деревьев, шт.	59	17	62	9
Диаметр, $M \pm m$, см (<i>H</i> = 1,3 м)	15,3±5,37	15,0±5,25	6,7±4,47	7,2±3,18
Размах изменчивости, см	2,9–30,0	6,3–21,3	1,5–19,3	4,0–13,0
Коэффициент вариации, %	35,1	35,0	66,5	44,2

В сибсовом потомстве карельской березы 2-й изученной пары, произрастающей в насаждении на участке №2, также преобладали (46 %) деревья высокоствольной формы роста (рис. 3, в). Их высота в среднем составила около 5,0 м (от 1,2 до 10,6 м) и характеризовалась очень большим коэффициентом вариации – 52 % (табл. 2). Интересно, что в варианте скрещивания ♀51 × ♂58a около 70 % деревьев имели высоту до 6,0 м, а в гибридной семье ♀58a × ♂51 – наоборот, более 60 % из них превышали 6,0 м. Наибольшие различия по диаметру ствола зафиксированы в гибридной семье ♀51 × ♂58a, где значения колебались от 1,5 до 19,3 см (на высоте 1,3 м от шейки корня), а коэффициент вариации составил более 65 % (табл. 2). Почти у половины деревьев диаметр ствола был менее 6 см и только у 17 % превышал 12 см. Число деревьев с признаками узорчатости и без них в изученном сибсовом потомстве на участке было примерно равным. У 59 деревьев из 111 в большей или меньшей степени просматривались выпуклости на поверхности ствола, свидетельствующие об активном формировании узорчатой текстуры древесины. По характеру утолщений на поверхности стволов у деревьев шаровидноутолщенный тип более чем в 2 раза преобладал над мелкобугорчатым (рис. 3, з).

Проведенные исследования показали, что при плантационном выращивании карельской березы, а именно сибсового потомства, полученного в результате контролируемого опыления плюсовых деревьев, с предварительной подготовкой территории (удалением надземной и подземной частей древесной и травянистой растительности) и организацией регулярных уходов в 1-е десятилетие, можно достигнуть хороших результатов уже в течение 20–35 лет. Так, изучение формового разнообразия 35-летнего сибсового потомства карельской березы, находящегося на территории Заонежской ЛСП, выявило, что здесь оно почти на 80 % представлено деревьями с характерными внешними признаками наличия узорчатой текстуры древесины. Наряду с этим

в семенном потомстве отмечены существенные различия в проявлении указанных признаков не только между гибридными семьями, но и относительно родительских деревьев, а также в зависимости от возраста деревьев. Например, на участке № 1 спустя 20 лет после создания ЛСП в варианте скрещивания ♀130 × ♂136 преобладали деревья высокоствольной формы роста (65 %), которые по данному признаку соответствовали отцовскому растению, а по типу поверхности ствола, мелкобугорчатой (53 %), – материнскому. Подобное проявление внешних признаков наблюдали в варианте скрещивания ♀134 × ♂135, при скрещивании ♀131 × ♂136, наоборот, в потомстве хотя и ненамного, но преобладали деревья с короткоствольной (23 %) формой роста (подобно материнскому растению) и шаровидноутолщенным типом поверхности ствола (подобно отцовскому).

Существенные изменения в формовом составе насаждения, находящегося на участке № 1, как по высоте, так и по типу поверхности ствола произошли у карельской березы в возрасте от 20 до 35 лет, причем в разных семьях они проявились по-разному. Так, в варианте скрещивания ♀133 × ♂134 за указанный период в 1,5 раза увеличилось количество деревьев высокоствольной формы роста с шаровидноутолщенным типом поверхности ствола (рис. 4, а, в), а при обратном скрещивании ♀134 × ♂133, наоборот, более чем в 2 раза возросло количество деревьев короткоствольной формы роста с мелкобугорчатым типом поверхности ствола (рис. 4, б, г). По всей вероятности, это обусловлено генетическими особенностями родительских деревьев. В обеих семьях произошло уменьшение (почти в 1,5 раза) числа деревьев с кустообразной формой роста, что, скорее всего, связано с благоприятными условиями для их линейного (в высоту) роста, которые сложились на территории ЛСП в 1-е годы их развития.

Карельская береза на ранних этапах развития отличается очень низкой конкурентоспособностью по сравнению не только с другими древесными, но и с травянистыми растениями. На территории Заонежской ЛСП хорошо прослеживается изменение видового состава живого напочвенного покрова со времени создания участков № 1 и 2 (через 35 и 15 лет соответственно). Коэффициент флористической общности видов (по Жаккару) в изученных насаждениях карельской березы составил 0,47, что также свидетельствует о различиях между ними в сложившихся со временем экологических условиях. В частности, на участке № 1 по сравнению с участком № 2 доля мезо-гигрофитов в напочвенном покрове была заметно больше. Снижению влажности почвы, очевидно, способствовало характерное для березы [22] дренирующее действие корневых систем и кроны, перехватывающей атмосферные осадки. На изученных участках в травяно-кустарничковом ярусе преобладали светлюбивые виды – семигелиофиты, что обусловлено довольно редким размещением растений карельской березы на занимаемой площади при организации плантации. Изменение соотношения свето- и теневыносливых видов в целом не столь очевидно, но появление сциофитов на участке № 1 может свидетельствовать об изменении условий освещения в связи с развитием и частичным смыканием кроны произрастающих здесь деревьев карельской березы.

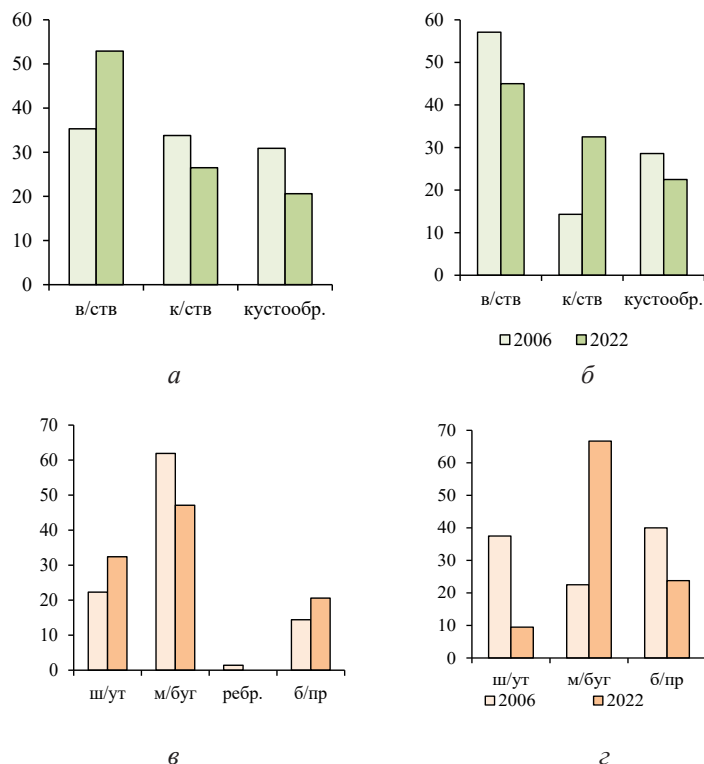


Рис. 4. Соотношение деревьев карельской березы (% от общего количества) по форме роста (*a*, *б*) и типу поверхности ствола (*в*, *г*) при прямом ♀133 × ♀134 (*a*, *в*) и обратном ♀134 × ♀133 скрещиваниях (*б*, *г*) в 2006 и 2022 гг.

Fig. 4. Proportions of curly birch trees (% of the total number) in forward crossing ♀133 × ♀134 (*a*, *в*) and backcrossing ♀134 × ♀133 (*б*, *г*) by growth forms (*a*, *б*) and trunk shapes (*в*, *г*) in 2006 and 2022

Существенные различия между изученными участками обнаружены в видовом составе травяно-кустарничкового яруса по их отношению к почвенному плодородию. При этом увеличение доли эвтрофных видов на участке № 1, скорее всего, также связано с изменением почвенных условий, которое произошло за счет регулярного поступления в почву опада березы. Более того, в насаждении данного участка опад сформирован в процессе более длительного накопления не только листьев и отмерших частей березы (например, веток), но и самой травяно-кустарничковой растительности. Известно, что богатый питательными веществами опад березы благоприятно влияет на трофность почв в таежной зоне [21]. Различия по видовому составу живого напочвенного покрова, выявленные между участками, обусловлены также отчасти видовым составом растительности, произрастающей на прилегающей к ним естественной лесной территории [5]. В результате на изученных участках ЛСП сложились вполне благоприятные условия по уровню освещения, увлажнения и почвенного плодородия для карельской березы. Кроме того, благодаря низкой густоте посадки (~460 шт./га) и

своевременному проведению уходов в обоих насаждениях отсутствует конкуренция деревьев карельской березы не только с другими древесными растениями, но и между собой.

Сравнительный анализ разновозрастных насаждений показал, что к возрасту 35 лет в гибридных семьях ($\text{♀}133 \times \text{♂}134$ и обратно) почти у 80 % деревьев были признаки узорчатости древесины, тогда как в 15-летнем сибсовом потомстве (от скрещивания $\text{♀}51 \times \text{♂}58$ и обратно) такие деревья составили только 53 %. По форме роста в изученных гибридных семьях около половины деревьев имели высокоствольную форму роста (54 и 46 % на участках № 1 и 2 соответственно). Высота деревьев в среднем составила около 9 и 5 м в насаждениях на участках № 1 и 2 соответственно. На участке № 1 диаметр ствола у потомства в среднем равнялся 15 см, при этом у 3 деревьев он составил 33 см, а у 60 % превышал 16 см. Диаметр ствола у деревьев на участке № 2 в среднем достигал 7 см, и они характеризовались активным как линейным, так и радиальным ростом.

Для сравнения приведем данные по другим территориям. В культурах карельской березы в условиях Костромской области к возрасту 12 лет высота деревьев в среднем варьировала от 3,7 до 5,9 м, диаметр ствола – от 3,4 до 6 см [2]. В условиях Нижегородской области к возрасту 12 лет высота растений карельской березы составила 3,5 м, диаметр ствола – 3,4 см [7], а к 24 годам – в среднем 16 м и 12 см соответственно [1]. В условиях Беларуси к возрасту 29 лет высота карельской березы колебалась от 7,2 до 12,2 м, диаметр ствола – от 16 до 21 см [20].

Обращает на себя внимание факт, что в условиях Карелии средняя высота 35-летних деревьев карельской березы в целом превышает высоту 15-летних в 1,8 раза, а по диаметру ствола – в 2,2 раза. Это согласуется с мнением ряда авторов [29]: для полноценного роста и развития, например, доля кроны березы повислой должна составлять не менее 50 % от высоты дерева. С возрастом биомасса стволовой древесины увеличивается, а доля ветвей уменьшается [31].

При выявлении карельской березы в природе, в искусственных насаждениях и при ее интродукции особую роль играет визуальная диагностика признаков, косвенно указывающих на формирование узорчатой текстуры древесины. Первые признаки начала формирования узорчатости у растений могут наблюдаться уже в возрасте 2–3 лет в виде утолщений или «валиков» в основании боковых побегов, тогда как у других видов березы они отсутствуют. С возрастом эти изменения усиливаются, и поверхность ствола становится шаровидноутолщенной – единичные крупные утолщения сменяются относительно ровными участками по длине ствола (рис. 5, а), мелкобугорчатой – многочисленные небольшие выпуклости относительно плотно и равномерно располагаются вдоль поверхности ствола (рис. 5, б) или ребристой – неровности проявляются в виде тяжей, вытянутых вдоль ствола. У деревьев без признаков узорчатости поверхность ствола ровная, выпуклости отсутствуют (рис. 5, в). По типу поверхности ствола можно ориентировочно судить и о степени насыщенности узорчатого рисунка в древесине. Например, шаровидноутолщенный тип обычно предполагает наличие крупноузорчатого рисунка преимущественно

в древесине утолщений и относительно слабом его проявлении или полном отсутствии на ровных участках ствола; ребристый – о слабой волнистости текстуры в древесине, которая в дальнейшем может усилиться. Наиболее насыщенная узорчатая текстура древесины по всей толщине ствола формируется, как правило, у деревьев с мелкобугорчатым типом поверхности ствола.



Рис. 5. Типы поверхности ствола у карельской березы: шаровидноутолщенный (а), мелкобугорчатый (б), без признаков узорчатости (в) и «запльвиший» (з). Июнь 2022 г.
 Fig. 5. Trunk shapes in curly birch: with necks and muffs (a), with small protuberances (b), without “figured grain” (v), and “bloated” (z). June, 2022. Zaonezhye forest seed orchard, Republic of Karelia

Судя по внешним признакам, к настоящему времени в насаждении участка № 1 скорость линейного роста деревьев начала снижаться, тогда как радиальный рост продолжается. Данный процесс сопровождается изменением характера не только поверхности ствола, но и текстуры древесины: насыщенность ее рисунка, по-видимому, уменьшается. Об этом свидетельствует «сглаживание» ранее выпуклой поверхности ствола вследствие увеличения толщины коры (рис. 5, з) и «выравнивание» рельефной, ямчатой поверхности древесины, что можно наблюдать после снятия коры. Поверхность ствола становится «бугорчатой», а ранее наблюдаемая «мелкобугорчатость» – слабо выражена. Специалисты, занимающиеся карельской березой, называют такое явление «запльванием» поверхности ствола и рекомендуют выращивать и заготавливать древесину в возрасте до 35 лет [6, 25, 30].

Заключение

Исследование sibсового потомства карельской березы, представленного на Заонежской лесосеменной плантации, показало, что даже при контролируемом опылении в гибридных семьях встречаются деревья со слабо выраженными

косвенными признаками «узорчатости» в древесине или с их отсутствием. Однако правильная организация мероприятий при создании целевых плантаций и проведение в них регулярных уходов позволяют к возрасту рубки получить насаждение, в котором более 80 % деревьев будут иметь признаки узорчатой древесины.

На территории Заонежской лесосеменной плантации к 2022 г. произрастает в целом не менее 3 тыс. деревьев, представляющих сибсовое потомство карельской березы в возрасте 35 и 15 лет. Деревья размещаются на 2 участках и по внешним признакам являются типичными как для условий Карелии, так и для ареала карельской березы в целом. Большинство из них находятся в хорошем состоянии. По форме роста на обоих участках доминируют высокоствольные деревья, что, вероятно, обусловлено их происхождением и благоприятными условиями для роста в 1-е десятилетия развития. В насаждении 35 лет преобладают деревья с мелкобугорчатым типом поверхности ствола, а в 15-летнем – с шаровидноутолщенным. Однако тип поверхности ствола, согласно полученным данным, с возрастом может изменяться. Исследования позволили также установить, что с возрастом существенно снижается скорость роста в высоту на фоне усиления роста по диаметру ствола. Стоит отметить, в 15-летнем насаждении у деревьев активно продолжается и линейный, и радиальный рост. При средней высоте 9 м у 60 % деревьев из 35-летнего насаждения диаметр ствола превышал 16 см. В случае целевого выращивания узорчатой древесины деревья с таким диаметром вполне пригодны для производства строганного шпона.

К настоящему времени исследованные нами искусственно созданные разновозрастные насаждения карельской березы плантационного типа являются наилучшими не только в Карелии, но и, по-видимому, в России. Это прежде всего объясняется тем, что здесь была проведена соответствующая подготовка территории, а в дальнейшем регулярно осуществлялись как агротехнические, направленные на увеличение приживаемости и сохранности саженцев, так и лесоводственные (рубки лиственной поросли и хвойного самосева) мероприятия, которые обеспечивали устранение конкуренции со стороны других лиственных и/или хвойных пород. Использование посадочного материала, выращенного из семян, полученных в результате контролируемого опыления плюсовых деревьев, способствовало значительному увеличению в потомстве числа растений, имеющих узорчатую текстуру древесины. Однако сами плюсовые деревья прошли селекционный отбор исключительно по морфологическим признакам без их генетической оценки. Относительно невысокая эффективность отбора по фенотипу, отсутствие методов ранней диагностики проявления признаков узорчатости предполагают необходимость проведения их генетической оценки деревьев, а для выращивания посадочного материала на данном этапе целесообразно использовать клональное микроразмножение лучших деревьев карельской березы *in vitro*, представленных, например, в коллекции клонов, созданной в лаборатории лесных биотехнологий Института леса Карельского научного центра РАН.

Оценивая общее состояние насаждений карельской березы, произрастающих на Заонежской лесосеменной плантации, как хорошее, следует иметь в виду, что, несмотря на их искусственное происхождение, они были созданы преимущественно с использованием местного генетического материала (карельского происхождения) и являются частью ценного генофонда, который требует сохранения и в будущем мог бы обеспечить расширенное воспроизводство карельской березы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабаев Р.Н. Селекционная оценка представителей рода береза (*Betula* L.) при интродукции в Среднее Поволжье на примере Нижегородской области: дис. ... канд. с.-х. наук. Н. Новгород, 2022. 345 с.
Babaev R.N. *Breeding Evaluation of Representatives of the Genus Birch (Betula L.) during Introduction into the Middle Volga Region on the Example of Nizhny Novgorod Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2022. 345 p. (In Russ.).
2. Багаев С.С. Лесокультурное освоение осушенных земель на территории Костромской низины // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Пятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 22 мая 2019 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2019. С. 14–15.
Bagaev S.S. *Forestry Development of Drained Lands on the Territory of the Kostroma Lowland. Increasing the Efficiency of the Forest Complex: Materials of the 5th All-Russian National Scientific and Practical. Conf. with International Participation*. 2019. Petrozavodsk, PetrSU, pp. 14–15. (In Russ.).
3. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: важнейшие результаты и перспективы исследований: моногр. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 243 с.
Vetchinnikova L.V., Titov A.F. *Curly Birch: Major Results and Research Perspectives*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2021. 243 p. (In Russ.).
4. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Клональное микроразмножение редких представителей рода *Betula* L. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 51 с.
Vetchinnikova L.V., Titov A.F. *Clonal Micropropagation of Rare Representatives of the Genus Betula L.* Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2022. 51 p. (In Russ.).
5. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Костина Е.Э., Серебрякова О.С., Жигунов А.В. Особенности напочвенного покрова, сформированного под влиянием насаждений карельской березы в условиях Заонежья (Республика Карелия) // Изв. СПбЛТА. 2022. Вып. 240. С. 6–24.
Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kostina E.E., Serebryakova O.S., Zhigunov A.V. *Special Features of the Ground Vegetation Formed under the Effect of Curly Birch Stands in Zaonezhye, Republic of Karelia. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2022, iss. 240, pp. 6–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.6-24>
6. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Кузнецова Т.Ю. Карельская береза: биологические особенности, динамика ресурсов и воспроизводство: моногр. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 312 с.
Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kuznetsova T.J. *Curly Birch: Biological Characteristics, Resource Dynamics, and Reproduction*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2013. 312 p. (In Russ.).
7. Горелов Н.И., Козлов Н.А., Козьмин А.В. Испытательные культуры деревьев березы карельской // Лесн. хоз-во. 2011. № 1. С. 27–28.
Gorelov N.I., Kozlov N.A., Kozmin A.V. *Test Cultures of Curly Birch Trees. Lesnoye Khozyaystvo*, 2011, no. 1, pp. 27–28. (In Russ.).
8. Коллекция *in vitro* клонов редких растений семейства Betulaceae // Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. Режим доступа: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/465691/> (дата обращения: 03.07.23).
Collection of in vitro Clones of Rare Species of the Betulaceae Family. (In Russ.).
9. Кравченко А.В. Конспект флоры Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН 2007. 403 с.
Kravchenko A.V. *Compendium of Karelian Flora*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2007. 403 p. (In Russ.).
10. Лаур Н.В. Единый генетико-селекционный комплекс. Петрозаводск: ПетрГУ, 2011. 130 с.
Laur N.V. *Unified Genetic and Breeding Complex*. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2011. 130 p. (In Russ.).

11. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений: (На примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.

Мамаев S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).

12. Мордась А.А., Раевский Б.В., Акимова Е.В. Рост и развитие полусибсовых потомств сосны обыкновенной на ранних этапах онтогенеза // Научные основы селекции древесных растений Севера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 43–50.

Mordas A.A., Raevsky B.V., Akimova E.V. Growth and Development of Semi-sibs Scotch Pine Progeny at the Early Stages of Ontogenesis. *Scientific Bases of Breeding Woody Plants of the North*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 1998, pp. 43–50 (In Russ.).

13. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2023. Режим доступа: <https://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 27.06.23).

Plantarium: Open On-line Atlas and Key to Plants and Lichens of Russia and Neighboring Countries, 2007–2023. (In Russ.).

14. Прокопюк В.М., Раевский Б.В. Современное состояние объектов генетико-селекционного комплекса хвойных видов Республики Карелия // Тр. КарНЦ РАН. 2022. № 3. С. 22–27.

Prokopyuk V.M., Raevsky B.V. The Current State of the Conifer Species Selective Breeding Network in the Republic of Karelia. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2022, no. 3, pp. 22–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/ecc01506>

15. Рабочий проект реконструкции лесосеменной плантации первого порядка в Заонежском лесхозе Республики Карелия. М., 2003. 127 с.

Detailed Project for Reconstruction of the First Order Forest Seed Plantation in Zaonezhsky Forestry Enterprise of the Republic of Karelia. Moscow, 2003. 127 p. (In Russ.).

16. Раевский Б.В. Современное состояние и перспективы развития единого генетико-селекционного комплекса Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 88–95.

Raevsky B.V. The Current State and Development Perspectives of Woody Species Breeding Base in Karelia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 5, pp. 88–95. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/13b/lkh9.pdf>

17. Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонко Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 9–37.

Raevsky B.V., Ignatenko R.V., Novichonok E.V., Prokopyuk V.M., Kuklina K.K. The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 9–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-9-37>

18. Раевский Б.В., Куклина К.К., Шурова М.Л. Селекционно-генетическая оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2020. № 3. С. 45–59.

Raevsky B.V., Kuklina K.K., Schurova M.L. Genetic and Breeding Assessment of Scotch Pine Plus Trees in Karelia. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2020, no. 3, pp. 45–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb1163>

19. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 215 с.

Ramenskaya M.L. *Analysis of Flora in the Murmansk Region and the Republic of Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 215 p. (In Russ.).

20. Сидор А.И., Ковалевич А.И., Луферова Н.С., Ревяко И.Д., Мальцева Л.В., Фомин Е.А. Карелка: Что имеем ... // Лесн. и охотничье хоз-во. 2016. № 11. С. 18–23.

Sidor A.I., Kovalevich A.I., Lufurova N.S., Revuako I.D., Maltseva L.V., Fomin E.A. Curly Birch: What do We Have.... *Forestry and Hunting*. 2016, no. 11, pp. 18–23. (In Russ.).

21. Солодовников А.Н. Показатели плодородия почв под лиственными и хвойными лесами в среднетаежной подзоне Северо-Запада России // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. Ст. 602. Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2015/6/226.pdf> (дата обращения: 03.07.23).

Solodovnikov A.N. Soil Fertility Indicators under Deciduous and Coniferous Forests in the Middle Taiga Subzone of Northwest Russia. *Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 6, 602 p. (In Russ.).

22. Тарасова Ю.В., Матвеев И.В., Орешкин Д.Г. Влияние одиночных берез (*Betula pendula* Roth) на характеристики почв некоторых растительных сообществ таежной зоны // Вестн. СПбГУ. 2003. Сер. 3: Биология. Вып. 3(19). С. 37–46.

Tarasova J.V., Matveev I.V., Oreshkin D.G. The Influence of Single Birches (*Betula pendula* Roth) on Characteristics of Soil in Some Plant Communities in the Taiga Zone. *Bulletin of St. Petersburg State University*, 2003, ser. 3, iss. 3 (no. 19), pp. 37–46. (In Russ.).

23. Царев А.П., Лаур Н.В., Щурова М.Л. Состояние и проблемы развития постоянной лесосеменной базы в Республике Карелия // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. Петрозаводск, 1996. Вып. 1. С. 100–103.

Tsarev A.P., Laur N.V., Shchurova M.L. The Current State and Development Problems of Permanent Forest Seed Base in the Republic of Karelia. *Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU*. Petrosavodsk, 1996. Iss. 1, pp. 100–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.1996.2377>

24. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойношироколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 197 с.

Cyganov D.N. *Phyto-indication of Ecological Regimes in the Subzone of Coniferous-deciduous Forests*. Moscow, Nauka Publ., 1983. 197 p. (In Russ.).

25. Щурова М.Л. Состояние насаждений карельской березы в Республике Карелия // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды: материалы междунар. конф., Петрозаводск, 20–24 июня 2001 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 305–310.

Shurova M.L. The Current State of Curly Birch Plantations in the Republic of Karelia. *Structural and Functional Deviations from Normal Growth and Development of Plants under the Influence of Environmental Factors. Material of intern. conf.* Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2011, pp. 305–310. (In Russ.).

26. Ellenberg H. *Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas*. Gottingen, 1974. 97 p. (In Germ.).

27. Ellenberg H. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In Okologischer, Dynamischer und Historischer Sicht*. Stuttgart, 1996. 1095 s. (In Germ.).

28. Landolt E. *Okologische Zeigerwerte zur Sweizer Flora*. Veroff. Geobot. Inst. Zurich, 1977. H. 64. P. 1–208. (In Germ.).

29. Niemistö P. Effect of Growing Density on Biomass and Stem Volume Growth of Downy Birch Stands on Peatland in Western and Northern Finland. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 1–24. <https://doi.org/10.14214/sf.1002>

30. Paganová V. Analysis of Inheritance and Growth of Curly Birch Progenies from Controlled Hybridisation and Possibilities of their Utilisation for Timber Production in Agricultural Landscape. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 51–62. <https://doi.org/10.17221/3700-CJGPB>

31. Perala D.A., Alvin A.A. Regeneration Silviculture of Birch – A Review. *For. Ecol. Manage.*, 1990, vol. 32, pp. 39–77. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90105-K](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90105-K)

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*261:004.93

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-27-41

ГИС-анализ влияния типа землепользования на современное разнообразие лесонасаждений в национальном парке «Кенозерский»

*А.В. Козыкин*¹, *науч. сопр.*; *ResearcherID: HNQ-5782-2023*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7182-953X>

*Е.Н. Наквасина*², *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: A-5165-2013*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>


¹Национальный парк «Кенозерский», наб. Северной Двины, д. 78, г. Архангельск, Россия, 163000; gryllus2007@gmail.com

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e.nakvasina@narfu.ru[✉]

Поступила в редакцию 01.04.22 / Одобрена после рецензирования 18.07.22 / Принята к печати 23.07.22

Аннотация. Проблема забрасывания сельскохозяйственных земель является общемировой. В лесной зоне трансформация залежей связана с облесением и формированием так называемых вторичных/производных лесов. Постагрогенные леса отражают сельскохозяйственную историю залежных участков, на которых запечатлены «немые» реалии времени и социального порядка их освоения. Тип предыдущего землепользования создает достаточно устойчивые факторы, которые в процессе естественного зарастивания слабо меняются под воздействием природных факторов и влияют на формирующиеся леса. На ключевом участке Кенозерского национального парка (среднетаежный лесной район), расположенного в Плесецком районе Архангельской области, проследили согласно межевым планам 1861 г. закономерности эволюции участков землепользования разных категорий при зарастании лесом. Оценили площади, породную и типологическую структуру современных лесов согласно лесоустройству 2014 г., выявили связь трансформации агроэкосистем в лесные системы с историей использования этих земель после межевания. По состоянию на год составления межевых планов более 1/2 территории ключевого участка было подвержено аграрному воздействию (пашни, перелого, сенокосы и т. п.). Спустя 160 лет сформировался лесной массив (97 % территории), в котором сохранилась часть сенокосов. В первую очередь лесами зарастали перелого и сенокосы (99 и 85 % соответственно). Пovyдельная характеристика таксационных описаний лесных насаждений показала, что на заброшенных пашнях, перелогах и сенокосах чаще (89,7; 81,0; 78,5 % соответственно) возникали сосняки черничные и кисличные. Все сформированные насаждения, отнесенные при лесоустройстве к соснякам черничным и кисличным, имеют достаточно высокую продуктивность (I–II классы бонитета) и смешанный состав. Леса более низкого бонитета (III и IV) учтены на перелогах при формировании черничного типа леса. В настоящее время примерно у 70 % указанных на межевом плане 1861 г. сосняков черничных и кисличных, сформированных на пашнях, в составе преобладает береза (более 3 ед.), примерно у 10 % – ольха серая; высока доля насаждений с превалированием осины. Пониженное плодородие почв на переложных участках обеспечило более устойчивое положение сосны в составе формирующихся древостоев (60 % насаждений с преобладанием сосны в составе).

© Козыкин А.В., Наквасина Е.Н., 2023

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

Характер состава древесных пород в насаждениях, сформированных на сенокосах, соответствует угодьям с высоким плодородием почв, что говорит об образовании сенокосных угодий на заброшенных пашенных землях. Исследования продемонстрировали значительную дифференциацию ландшафтов производных лесов, иногда скрытую за счет повсеместного разрастания основных лесообразующих пород и формирования лесных массивов по зональному типу. Внутриландшафтная дифференциация, связанная с историей сельскохозяйственного освоения, сохраняется более 100 лет и требует пристального изучения.

Ключевые слова: межевые планы, план лесонасаждений, залежи, категории земель, пашня, перелог, сенокос, тип леса, бонитет, состав древостоя, ГИС-анализ, геоинформационная система, Кенозерский парк

Благодарности: Исследование выполнено в рамках темы «Идентификация объектов подсечно-огневого и переложного ведения хозяйства на территории Кенозерского национального парка».

Для цитирования: Козыкин А.В., Наквасина Е.Н. ГИС-анализ влияния типа землепользования на современное разнообразие лесонасаждений в национальном парке «Кенозерский» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 27–41. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-27-41>

Original article

GIS-analysis of the Influence of the Land Use Type on the Current Diversity of Forest Plantations in the Kenezersky National Park

*Alexander V. Kozykin*¹, Research Scientist; ResearcherID: [HNQ-5782-2023](https://orcid.org/0009-0002-7182-953X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7182-953X>

*Elena N. Nakvasina*²✉, Doctor of Agriculture, Prof.; ResercherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

¹Kenezersky National Park, Researcher, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 78, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; gryllus2007@gmail.com

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e.nakvasina@narfu.ru✉

Received on April 1, 2023 / Approved after reviewing on July 5, 2023 / Accepted on July 10, 2023

Abstract. The problem of agricultural land abandonment is a worldwide problem. In the forest zone, the transformation of fallow lands is associated with afforestation and the formation of so-called secondary forest growths. Postagrogenic forests reflect the agricultural history of fallow areas, which imprint the "mute" realities of time and the social order of their development. The type of previous land use creates sufficiently stable factors, which in the process of natural overgrowth are weakly changed by natural factors and affect the emerging forests. In the key area of Kenezersky National Park (middle taiga forest region), located in the Plesetsk District of the Arkhangelsk region, we traced, according to the 1861 boundary plans, the regularities of evolution of land use areas of different categories during forest overgrowth. We assessed the area, tree species and typological structure of modern forests according to the 2014 forest inventory and traced the connection between the transformation of agro-ecosystems into forests and the history of the use of these lands after the land



survey. As of the year when the boundary plans were drawn up, more than half of the territory of the key site was under agrarian influence (arable land, perelogs, haymaking, etc.). After 160 years a forest massif was formed (97 % of the territory), in which a part of hayfields was preserved. First of all, perelogs and hayfields were overgrown with forests (99 and 85 %, respectively). The allocation characterization of taxation descriptions of forest stands showed that bilberry and oxalis type pine forests were formed more often (89,7; 81,0; 78.5 %, respectively) on abandoned arable lands, perelogs and hayfields. All formed stands, classified as bilberry and oxalis type pine forests during forest inventory, have rather high productivity (I–II quality classes) and mixed composition. Forests of lower quality classes (III and IV) were revealed in the formation of bilberry forest type. At present about 70 % of the bilberry and oxalis type pine forests on the 1861 boundary plan, formed on arable land, are dominated by birch (more than 3 units), about 10 % – by gray alder; the share of stands dominated by aspen is high. Reduced soil fertility on swidden plots ensured a more stable position of pine in the composition of emerging stands (60 % of pine-dominated stands). The character of tree species composition in stands formed on hayfields corresponds to lands with high soil fertility, which indicates the formation of hayfields on abandoned arable land. The studies have demonstrated significant differentiation of derived forest landscapes, sometimes hidden due to the widespread growth of the main forest-forming species and the formation of zonal-type forests. Intralandscape differentiation associated with the history of agricultural development has been preserved for more than 100 years and requires close study.

Keywords: boundary plans, plantation plan, fallow lands, land categories, arable land, perelog, haymaking, forest types, quality class, stand composition, GIS-analysis, geographic information system, Kenozersky Park

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the theme "Identification of objects of slash-and-burn and swidden farming on the territory of Kenozersky National Park".

For citation: Kozykin A.V., Nakvasina E.N. GIS-analysis of the Influence of the Land Use Type on the Current Diversity of Forest Plantations in the Kenozersky National Park. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 27–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-27-41>

Введение

Выход земель из сельхозоборота является общемировой проблемой, которая обусловлена различными причинами: социальными, природными, военными и т. п. [22, 24, 25, 28]. В регионах с близко расположенными к сельскохозяйственным объектам лесными массивами трансформация залежей связана с облесением и формированием так называемых вторичных/производных лесов. На Европейском Севере России производные леса, в т. ч. сформированные на заброшенных сельскохозяйственных землях, сегодня преобладают [3], нарушая структуру доагрикультурных лесных экосистем. По мнению Д.В. Трубина [20], только в южной части Архангельской области постагrogenных лесов насчитывается более 1 млн га. Это связано с распространением в лесной зоне подсечно-огневой, а затем переложной систем земледелия [12], при которых в состав агроэкосистемного комплекса, тяготеющего к населенным пунктам, входили как постоянные пашни с повышением плодородия почв за счет удобрений (навоз, торф, зола, иногда известь), так и лесные перелogi (резервный фонд освоенных под сельское хозяйство земель, оставленный на временное естественное зарастание), сенокосы.

Общим для всех залежных угодий является то, что при зарастании лесом эволюционная трансформация идет в направлении зональных типов лесных экосистем [6] с расселением доступных от стен леса пород [2, 26]. Локальные процессы, связанные с плодородием почв, влияют на данный процесс [26], хотя и рассматриваются редко. Именно плодородие почв определяет начальные этапы восстановительных сукцессий [6], приводя к формированию различных по породному составу и типу лесов. История сельскохозяйственных земель позволяет говорить об «эффекте наследия», который определяет скорость протекания восстановительных процессов [4, 32, 35], что связано с разрастанием сдерживающей поселения древесных видов травянистой растительности на распаханных участках.

Основываясь на принципах исторической экологии [5, 17, 30], мы должны признать, что постагрогенные леса отражают сельскохозяйственную историю залежных участков, на которых запечатлены «немые» реалии времени и социального порядка их освоения [8]. Влияние истории землепользования может проявляться в течение нескольких столетий и выражаться в снижении биоразнообразия [29, 36], изменении морфологии и свойств почвы [23], структуре и продуктивности лесных насаждений [31, 34]. Тип предыдущего землепользования создает достаточно устойчивые факторы, которые в процессе естественного зарастания слабо меняются под воздействием природных и влияют на формирующиеся леса [27].

Определить историческую принадлежность конкретной залежи, заросшей лесом, к той или иной категории земель достаточно трудно, необходимо почвенное опробование каждого участка [14]. Однако работа упрощается при наличии разновременных картографических материалов. Их совмещение позволяет проследить внутриландшафтную дифференциацию [10] заброшенных много лет назад агрокультурных ландшафтов и современных насаждений, сформированных на различных угодьях землепользования. Подобные сравнительные исследования для разных временных отрезков проводят как в России, так и за рубежом, совмещая исторические планы с современными топоосновами и космоснимками [9, 33].

Особый интерес для России представляет изучение современного состояния постагрогенных лесов в сочетании с материалами Генерального межевания периода максимального сельскохозяйственного освоения территории (середина и 2-я половина XIX в.). Подобные исследования данных о старых залежных массивах позволят установить связь между современным состоянием лесов и историей землепользования, построить прогнозные модели перспектив формирования лесов на современных залежах, в значительном количестве появившихся в конце XX в. Кроме того, для системы особо охраняемых природных территорий речь идет также о сохранении и, возможно, историческом восстановлении ценных в историко-культурном и природном отношении агроландшафтов [19], что поддерживается программами Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [15].

Цель исследования – на ключевом участке в границах Кенозерского национального парка проследить по межевым планам 1861 г. закономерности эволюции участков землепользования разных категорий при зарастании лесом; оценить площади, породную и типологическую структуру современных ле-

сов, сформировавшихся на залежах разных категорий землепользования; проследить связь трансформации агроэкосистем в лесные системы с историей их использования для прогнозирования формирования постагрогенных производных лесов современного отчуждения сельскохозяйственных земель.

Объекты и методы исследования

Для исследования был выбран ключевой участок общей площадью 28 481,6 га в границах Кенозерского национального парка, расположенный в юго-западной, южной и юго-восточной частях побережья оз. Кенозера. Участок относится к Плесецкому району Архангельской области (среднетаежный лесной район). Особенностью территории является карбонатная локальная морена, которая повышает плодородие почв, но не препятствует протеканию зонального почвообразовательного процесса. Выветривание карбонатов приводит к формированию дерново-подзолистых и подзолистых почв. Подобная литология характерна для юго-западной части Архангельской области [2].

На большей части территории парка благодаря почвенно-литологическим особенностям региона исторически сформировался аграрный комплекс с наличием разных систем земледелия [18]. Здесь сочетались постоянные пашни дву-, трехполья и лесные перелогии как элементы подсечно-огневого земледелия, характерного для Севера, в сочетании с сенокосами, пастбищами и распространенными лесными и болотными угодьями.

Выбор ключевого участка исследования связан с наличием планов межевания части Олонецкой губернии 1861 г., обнаруженных в Национальном архиве Республики Карелии [11].

Исторические карты, выполненные вручную на основе материалов полевой межевой инструментальной съемки в масштабе, соответствующем метрической системе 1 мм – 8,4 м, позволяют увидеть структуру земельных угодий с их дифференциацией по категориям земель в принятой терминологии того времени. Межевые планы достаточно точно привязаны к опорным точкам территории и хорошо укладываются по ним на современные топоосновы. В качестве опорных точек связей геопривязки использованы наиболее явные элементы гидрографической сети, побережья озер, межуездные просеки, а также часовни и дороги (в случае их неизменного местоположения с середины XIX в.).

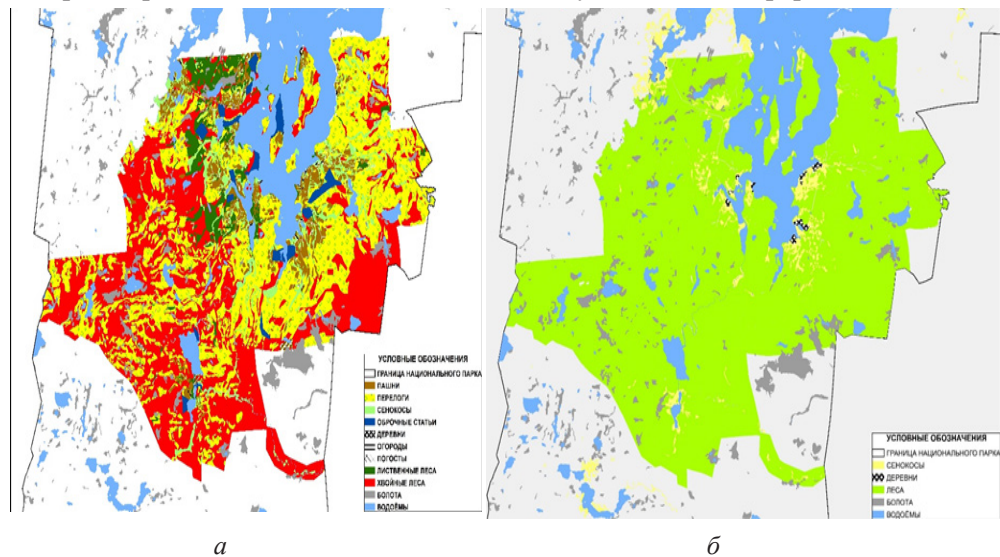
Современной топоосновой послужили векторная карта лесонасаждений (1:25000) и пирамидальные сборки космических снимков высокого разрешения с файлами привязки с интернет-ресурса SAS-Planet [21]. Для анализа структурных изменений категорий земель и растительного (лесного) покрова применены представленные в геоинформационной системе слои лесоустройства Кенозерского национального парка 2014 г. с атрибутивной информацией по лесным выделам (тип леса, бонитет, состав, возраст и др.) [16]. Пространственная привязка растровых аналогов межевых планов, их обработка и векторизация произведены в программе ArcMap 10.6 с использованием базовых инструментов. Методика выполнения работ детально описана в статье А.В. Козыкина [7].

При векторизации были приняты некоторые упрощения легенды с учетом изменения терминологии за 2 века, а также сделано допущение неизменности границ участков современной акватории водоемов и болот с момента прове-

дения межевой съемки. Несомненно, при совмещении исторических планов и современных карт появлялись некоторые неточности по площади полигона (0,95 %), что может быть связано не только с разными приемами съемки, но также с изменчивостью границ агроландшафтов со временем под влиянием природных факторов. Однако данная погрешность не отразилась на общих выявленных тенденциях и закономерностях.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно межевым планам 1861 г. соотношение хозяйственных угодий в середине XIX в. кардинально отличалось от современного (см. рис.). Анализ структуры «продуктивных» земель (т. е. без учета вод и болот) того времени показывает, что более половины территории ключевого участка было подвержено аграрному воздействию (табл. 1). На долю лесных угодий, локально распределенных между сенокосами, пашнями, перелогам, приходилось 47 % площади. Большую часть неосвоенных лесов составляли хвойные насаждения (90 %), что могло быть связано с бедностью или заболоченностью почв – характеристиками, которые ограничивали использование лесных участков под аграрное освоение.



План ключевого участка: *a* – по межевым планам 1861 г. (масштаб: 1 мм – 8,4 м);
б – современный (масштаб: 1:25 000)

Key site plan: *a* – according to the survey plans of 1861 (Scale: 1 mm – 8,4 m); *б* – modern key site plan (Scale: 1:25 000)

Распределение земель разных категорий по территории ключевого участка было неравномерным и имело социально-экономическую приуроченность. Участки постоянной пашни, на которых плодородие поддерживалось внесением навоза, торфа, составляли лишь 6,4 % всех продуктивных земель, тяготели к 500-метровой зоне вблизи деревни, занимая до 45 % территории этой зоны. Перелог традиционно выносили дальше от деревень, подбирая наиболее плодородные участки, занятые лесом, и проводя подсеку. Их доля вблизи деревень не превышала 11 %. Соотношение пашен и перелогов/сенокосов составляло 1:6. Большие площади перелогов объясняются их кратковременным использованием (не более 8 лет),

оставлением на восстановительный период (25–40 лет) и возможной повторной эксплуатацией. Новые перелогии начинали разрабатывать для обеспечения населения продуктами питания (зерновые, репа, горох). Часто перелогии после использования под посевы переводили в сенокосы. В результате сенокосы были мозаично распространены по всей территории ключевого участка.

Прекращение планомерной обработки пахотных участков и зарастание их лесом, в особенности на перелогах, началось в 80–90 гг. XIX в. Это подтверждается анализом возрастной структуры современных насаждений при ГИС-обработке и натурных исследованиях, проводимых в Кенозерском национальном парке. Очевидно, что процесс возобновления лесов на сельскохозяйственных землях не был одновременным и однонаправленным. После межевания 1861 г. одни перелогии зарастали лесом, другие разрабатывались вновь. Этот процесс вполне укладывается в понятие переложной системы земледелия. К началу XXI в. в пределах участков, идентифицированных в 1861 г. как лесные, сохранились сенокосные поляны, занимающие 0,7 % от первоначальной площади лесов. Кустарниковые пустоши, которые можно было легко расчистить, переводили в сенокосы (90 %), или такие земли зарастали лесом.

Через 160 лет после межевания структура земель ключевого участка полностью изменилась: большинство аграрных земель заросло лесом. Сформировался лесной массив (97 %), в котором сохранились сенокосы, частично используемые в таком качестве населением деревни, частично перешедшие в лесные поляны (табл. 1). Производные леса, произрастающие на различных категориях сельскохозяйственных земель, могут иметь особенности, связанные с продуктивностью, составом, типами почвенного покрова. Особый интерес в этом отношении представляют наиболее распространенные массивы угодий (пашни, перелогии, сенокосы), отличающиеся такими экологическими характеристиками, как распаханность, плодородие почв, выраженная дернина.

Таблица 1

**Динамика распределения продуктивных земель на ключевом участке
Кенозерского национального парка
Dynamics of productive land distribution in the key area of Kenozersky National Park**

Тип угодья	Межевой план 1861 г.				План лесонасаждений 2014 г.	
	весь полигон		в пределах 500 м от деревень			
	га	%	га	%	га	%
Лес	10 797,0	46,6	186,2	18,6	22 680,7	96,9
Кустарниковая пустошь	120,2	0,5	13,6	1,4	0	0
Сенокос	1454,8	6,3	206,1	20,6	665,2	2,8
Перелог	9253,7	40,0	110,3	11,1	0	0
Пашня	1469,2	6,4	445,5	44,6	0	0
Огороды	1,6	0	1,6	0,2	0	0
Деревня	34,6	0,2	34,9	3,5	69,6	0,3
<i>Всего</i>	23 131,1	100,0	998,2	100,0	23 415,5	100,0

Наиболее интенсивно лес восстанавливается на перелогих (табл. 2), которые, как правило, находятся в непосредственной близости к стенам неиспользуемого в XIX в. леса и имели меньшее аграрное воздействие. Более 99 % всех перелогов, отмеченных на межевом плане 1861 г., в настоящее время представлено лесными участками, часть – сенокосами. При этом только 7 % пашен перешли в лесные массивы (современное состояние), что может быть связано с разрастанием мешающей естественному поселению древесных пород травянистой растительности на плодородных почвах [2]. На медленную колонизацию древесными видами заброшенных участков с плодородными почвами в других регионах также указывали [35]. Зброшенны пашни с богатым травостоем, тем более расположенные вблизи деревень, могли в первую очередь использоваться под сенокосы, что и сохранилось до настоящего времени. Промежуточное пользование сдерживало разрастание древесных пород на начальных этапах натурализации залежей. Доля таких сенокосов (после пашни) составляет 60 % от площади сенокосов настоящего времени. Зброшенны сенокосы того времени на 85 % заросли лесом, однако их часть (13 %) сохранилась, хотя дальние участки вряд ли используются в настоящее время и служат перспективным фондом постепенного зарастания лесными породами.

Таблица 2

**Современная трансформация площади сельскохозяйственных угодий
на ключевом участке Кенозерского национального парка (га / %)
Modern transformation of agricultural land in the key area
of Kenozersky National Park (ha / %)**

Тип угодья по межевому плану 1861 г.	Всего по плану лесонасаждений 2014 г.	В том числе по современным категориям угодий	
		лес	сенокос
Пашня	1469,2 / 12,1	1037,1 / 70,6	402,1 / 27,3
Перелог	9253,7 / 76,0	9171,1 / 99,1	73,5 / 0,8
Сенокос	1454,8 / 11,9	1241,3 / 85,3	189,6 / 13,0
<i>Всего</i>	12 177,7 / 100*	11 449,5 / 94,0	665,2 / 5,5

* Площадь 63 га / 0,5 % находится под другими категориями земель (линии электропередач).

Провели повидельную характеристику таксационных описаний лесных насаждений, используя современную атрибутику. Проследили структуру современных лесных насаждений по типу леса (напочвенному покрову формации) в разрезе основных категорий сельскохозяйственных угодий согласно межевому плану 1861 г. (табл. 3).

Участки постоянной пашни и перелогих середины XIX в. представлены насаждениями, на 90 и 81 % соответственно протаксированными при современном лесоустройстве как сосняки черничные и кисличные. Остальные типы леса сформировались на небольшой доле площади (от 6,0 до 0,1 %), что может быть связано с особенностями подбора площадей под распашку того времени. При подборе участков оценивалось не только плодородие почвы, но и наличие строевого леса, который можно было использовать в хозяйственных целях [12]. Нередко при межевании перелогов землемеры упрощали их границы и снижали

дробность выделов, включая в их контуры заведомо неиспользуемые участки заболоченных типов леса. Аналогичная типологическая эволюция формирующихся лесов представлена и на сенокосных участках – 78,5 % площадей отнесено к соснякам черничным и кисличным, что еще раз подтверждает послерубочное формирование сенокосных участков при переводе распаханых перелогов в сенокосы на промежуточное пользование.

Таблица 3

Типологическая структура современных лесов, образованных на бывших сельскохозяйственных угодьях на ключевом участке Кенозерского национального парка
Typological structure of modern forests formed on agricultural land in the key area of Kenozersky National Park

Тип леса	Площадь леса							
	весь полигон		в том числе по бывшим категориям земель					
			пашня		перелог		сенокос	
	га	%	га	%	га	%	га	%
Ивняк тр.-болотный	5,4	0	0,6	0,1	0,1	0	2,4	0,2
Е. прир.-крупнотравный	393,5	1,7	2,8	0,3	173,7	1,9	34,7	2,8
С. лишайниковый	114,0	0,5	3	0,3	4,1	0	0,4	0
С. долгомошный	103,0	0,5	3,7	0,4	33,0	0,4	2,1	0,2
Е. долгомошный	597,2	2,6	3,9	0,4	147,0	1,6	17,9	1,4
С. сфагновый	352,2	1,6	4,5	0,4	90,1	1,0	3,2	0,3
С. брусничный	288,0	1,3	6	0,6	32,4	0,3	6,7	0,5
Е. кисличный	317,4	1,4	12,6	1,2	177,3	1,9	14,8	1,2
Е. тр.-болотный	1195,1	5,3	12,7	1,2	294,1	3,2	56,8	4,6
С. тр.-болотный	936,5	4,1	24,1	2,3	226,9	2,5	66,5	5,4
Е. черничный	1744,1	7,7	32,4	3,1	566,4	6,2	61,1	4,9
С. кисличный	5617,3	24,8	316,2	30,5	3018,1	32,9	375,3	30,2
С. черничный	11 017,0	48,5	614,6	59,2	4407,9	48,1	599,4	48,3
<i>Всего</i>	22 680,7	100	1037,1	100	9171,1	100	1241,3	100

Примечание: С. – сосняк; Е. – ельник; тр. – травяной; прир. – приручейный.

Все сформированные насаждения, отнесенные к соснякам черничным и кисличным, имеют достаточно хорошую продуктивность (табл. 4) и смешанный состав (табл. 5). Плодородие пашен обеспечило преобладающее формирование насаждений высоких классов бонитета (по сосне) как в кисличном, так и в черничном типе леса. Нужно отметить, что аграрное строение почв может сохраняться до 300 лет [1], а плодородие почв бывших пашенных лесов и через 100 лет остается выше среднего по региону [2]. При этом на пашнях, перелогах и сенокосах сохраняются зональные типологические особенности продуктивности. Преобладающий бонитет кисличных типов леса выше черничных на I класс. IV класс бонитета встречается только в черничном типе леса, что соответствует пониженному плодородию почв. Леса более низкого бонитета (III и IV) больше сформировались на перелогах, что связано с непродолжительным использованием этих земель в качестве пахотных и гетерогенностью почв.

Таблица 4

Распределение по классам бонитета современных сосняков черничных и кисличных, образованных на бывших сельскохозяйственных угодьях (га / %)
Distribution of bilberry and oxalis pine forests by quality classes, formed on former agricultural land (ha / %)

Класс бонитета	Типы современного леса по бывшим категориям земель					
	Пашни		Перелог		Сенокосы	
	С. кисл.	С. черн.	С. кисл.	С. черн.	С. кисл.	С. черн.
Ia	20,7 / 6,5	0,9 / 0,1	26,7 / 0,9	0,4 / 0,01	6,7 / 1,8	0,3 / 0,05
I	277,3 / 87,7	315,7 / 51,4	2201,9 / 73,0	1439,5 / 32,7	290,3 / 77,3	224,1 / 37,4
II	18,2 / 5,8	232,8 / 37,9	780,7 / 25,9	2699,7 / 61,3	77,2 / 20,6	333,9 / 55,7
III	0	65,1 / 10,6	8,8 / 0,3	248,8 / 5,6	1,1 / 0,3	39,9 / 6,7
IV	0	0,1 / 0,02	0	19,5 / 0,4	0	1,2 / 0,2
<i>Всего</i>	316,2 / 100	614,6 / 100	3018,1 / 100	4407,9 / 100	375,3 / 100	599,4 / 100

Примечание: кисл. – кисличный; черн. – черничный.

В большинство насаждений, протаксированных по составу как сосняки (3 и более единиц в составе), входят и другие лесообразующие породы. Используя код ГИС – VMR, провели анализ сосняков черничных и кисличных на сельскохозяйственных угодьях, отмеченных на межевом плане 1861 г., по преобладающим в составе лесообразующим породам (по 5 видам, имеющим более 3 ед. в составе). В настоящее время примерно у 70 % сосняков черничных и кисличных, сформированных на пашнях, указанных на межевом плане 1861 г., в составе преобладает береза (более 3 ед.), примерно у 10 % – ольха серая; высока доля насаждений с преобладанием осины (табл. 5). Эти породы требовательны к плодородию почвы. Пониженное плодородие почв на переложных участках обеспечило более устойчивое положение сосны в составе формирующихся древостоев. Доля насаждений с превалированием сосны в черничном типе леса на старых перелогах достигает 60 %.

Таблица 5

Распределение по преобладающим в составе древостоя породам современных сосняков черничных и кисличных, образованных на бывших сельскохозяйственных угодьях (га / %)
Distribution of bilberry and oxalis pine forests prevailing in the composition of the forest stand, formed on former agricultural land (ha / %)

Преобладающая порода	Типы современного леса по бывшим категориям земель					
	Пашня		Перелог		Сенокос	
	С. кисл.	С. черн.	С. кисл.	С. черн.	С. кисл.	С. черн.
Сосна	22,6 / 7,1	124,7 / 20,3	959,8 / 31,8	2674,5 / 60,7	97,7 / 26,0	210,4 / 35,1
Береза	229,4 / 72,6	399,9 / 65,1	1875,1 / 62,2	1576,8 / 35,8	245,4 / 65,4	328,0 / 54,7
Осина	26,3 / 8,3	28,2 / 4,6	98,5 / 3,4	133,7 / 3,0	10,3 / 2,8	18,1 / 3,0
Ольха серая	37,9 / 12,0	61,7 / 10,0	77,6 / 2,6	22,9 / 0,5	21,9 / 5,8	42,9 / 7,2
<i>Всего</i>	316,2 / 100	614,6 / 100	3018,1 / 100	4407,9 / 100	375,3 / 100	599,4 / 100

Характер состава древесных пород в насаждениях, сформированных на сенокосах, соответствует угодьям с высоким плодородием почв (пашни и перелог кисличные), что еще раз подчеркивает факт образования сенокосных угодий на заброшенных пашенных землях. Высокое плодородие почв после прекращения пользования позволяло формироваться богатому травостою и получать хороший урожай сена.

Большинство сосняков черничных и кисличных имеют близкий минимальный возраст (120 лет по сосне), что говорит о достаточной одновременности забрасывания участков в конце XIX в. Несколько раньше начали забрасывать сенокосы: минимальный возраст сосны, произрастающей на бывших сенокосах, составил 140 лет. Под отчуждение в первую очередь попадали дальние непродуктивные сенокосы на перелогах.

Равновременность зарастания связана также и с мелкопольем, характерным для Севера. Только среди современных сосняков черничных и кисличных в пределах ключевого участка выделено 3370 учетных полигонов на площади 9334 га (средняя площадь выдела 2,8 га), распределенных согласно межевому плану. Как правило, площади пашен колебались от 1,5 до 14 га, площади сенокосов часто были еще меньше – от 0,9 до 9,0 га. Несколько большие площади могли относиться к подсекам, возможно, за счет сглаживания границ наделов они составляли от 4 до 77 га по межевым планам 1861 г. На плане лесонасаждений современные выделы нередко сохраняют прямоугольную форму поля при наличии четких границ угодья. Прежде всего это участки постоянной пашни долгого использования, зафиксированные краевыми бороздами или граничными канавками.

При подобных трансформациях мелких сельскохозяйственных залежей разных категорий возрастает неоднородность ландшафтов, обусловленные мозаикой почвы и растительности. Экологические изменения в ландшафтах могут быть непредсказуемы [28]. На локальные изменения, обусловленные антропогенным (аграрным) воздействием, накладываются природные факторы, в первую очередь отражающиеся в биоте. На этапах сукцессионных изменений меняются ценотические группировки и их продуктивность, свойства почв, перераспределяются биогеоценотические связи. В настоящее время процесс самозарастания залежей на ключевом участке можно считать завершенным, по прогнозам [13] он составляет примерно 120 лет. Существующие производные (постагрогенные) лесные насаждения исследуемого ключевого участка находятся в квазиклиматическом состоянии. Какими будут эти леса через 100–200 лет и будут ли они соответствовать зональным коренным аналогам, мы можем только предполагать.

Заключение

Территория Кенозерского национального парка, выбранная в качестве ключевого участка, отражает историю формирования производных лесов южной части Архангельской области. Совмещение современных планов лесоустройства и планов Генерального межевания 1861 г. демонстрирует значительную внутриландшафтную дифференциацию, иногда скрытую за счет повсеместного разрастания основных лесообразующих пород и формирования лесных массивов по зональному типу. Однако бывшие сельскохозяйственные угодья оказывают влияние на структуру производных лесов, их продуктивность. На современных планах лесные выделы могут быть укрупнены, однако внутриландшафтная дифференциация, связанная с историей сельскохозяйственного освоения, сохраняется и требует пристального изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Бобровский М.В. Лесные почвы Европейской России: биотические и антропогенные факторы формирования. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 359 с.
Bobrovsky M.V. *Forest Soils of European Russia: Biotic and Anthropogenic Factors of Formation*. Moscow, KMK Publ., 2010. 359 p. (In Russ.).
2. Голубева Л.В., Наквасина Е.Н. Трансформация постагрогенных земель на карбонатных отложениях. Архангельск: КИРА, 2017. 152 с.
Golubeva L.V., Nakvasina E.N. *Transformation of Postagrogenic Lands on Carbonate Deposits*. Arkhangelsk, KIRA Publ., 2017. 152 p. (In Russ.).
3. Громцев А.Н. Производные леса на западе таежной зоны России: понятия, происхождение, идентификация // Тр. КарНЦ РАН. 2019. № 5. С. 5–16.
Gromtsev A.N. Derived Forests in the Western Taiga Zone of Russia: Concepts, Origin, Identification. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, no. 5, pp. 5–16. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17076/eco900>
4. Гусев А.П. Антропогенная трансформация ландшафтов и сукцессии растительности // Вестн. ТюмГУ. Экология и природопользование. 2015. Т. 1, № 2(2). С. 103–110.
Gusev A.P. Anthropogenic Transformation of Landscapes and Vegetation Succession. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie = Bulletin of the Tyumen State University. Ecology and Nature Management*, 2015, vol. 1, no. 2(2), pp. 103–110. (In Russ.).
5. Дурновцев В.И. «Environmental history» как «Экологическая история» (историографические заметки) // Вестн. СурГПУ. 2017. № 6(51). С. 10–19.
Durnovtsev V.I. "Environmental history" as "Ecological history" (Historiographical notes). *Vestnik Surgutskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Bulletin of Surgut State Pedagogical University*, 2017, no. 6(51), pp. 10–19. (In Russ.).
6. Иванов А.Л., Завалин А.А., Кузнецов М.С. и др. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота / под ред. Г.А. Романенко. М.: Росинформагротех, 2008. 64 с.
Ivanov A.L., Zavalin A.A., Kuznetsov M.S. et al. *Agroecological State and Prospects of Utilization of Russian Lands Retired from Active Agricultural Turnover*. Ed. by G.A. Romanenko. Moscow, Rosinformagrotech Publ., 2008. 64 p. (In Russ.).
7. Козыкин А.В. Методика оценки изменений агрокультурного ландшафта на основе ГИС-обработки планов межевания 1861 г. и современного описания лесного фонда Национального парка «Кенозерский» // Ист. информатика. 2021. № 2. С. 221–232.
Kozykin A.V. Methodology of Assessment of Agro-cultural Landscape Changes based on GIS-processing of the 1861 Survey Plans and Modern Description of the Forest Fund of the Kenozersky National Park. *Istoricheskaya informatika = Historical Informatics*, 2021, no. 2, pp. 221–232. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2585-7797.2021.2.35089>
8. Косенков Г.Л., Колбовский Е.Ю. Периодизация и реконструкция истории освоения территории национального парка «Смоленское Поозерье» для целей типологии культурного ландшафта // Ярослав. пед. вестн. 2012. Т. 3, № 4. С. 232–238.
Kosenkov G.L., Kolbovsky E.J. Periodization and Reconstruction of the History of Development of the Territory of the Smolensk Lakeland National Park for the Purposes of the Cultural Landscape Typology. *Yaroslavskij pedagogicheskij vestnik = Yaroslavl Pedagogical Bulletin*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 232–238. (In Russ.).
9. Кукушкина О.В., Алябина И.О., Голубинский А.А. Опыт реконструкции земледельческого использования почвенного покрова Балахнинского уезда Нижегородской губернии в XVIII–XIX веках (по картографическим источникам) // Почвоведение. 2018. № 7. С. 882–892.

Kukushkina O.V., Alyabina I.O., Golubinsky A.A. Experience of Reconstruction of Land Use of the Soil Cover of Balakhna Uyezd, Nizhny Novgorod Province in the XVIII-XIX Centuries (based on Cartographic Sources). *Pochvovedenie* = Soil Science, 2018, no. 7, pp. 882–892. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0032180X18070067>

10. Матасов В.М. Внутриландшафтная динамика использования земель Мещерской низменности за последние 250 лет // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2017. № 4. С. 65–74.

Matasov V.M. Intralandscape Dynamics of Meshcherskaya Lowland Land Use Over the last 250 Years. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* = Bulletin of the Moscow University. Series 5: Geography, 2017, no. 4, pp. 65–74. (In Russ.).

11. Межевые планы съемки 1861 г. Кенозерской дачи Вершининской волости Каргопольского уезда Олонецкой губернии // Архив Кеноз. нац. парка. Ф. 1. Оп. 8. Д. 401. 402.

Survey plans of 1861 of Kenozerskaya Dacha of Vershininskaya Volost, Kargopol'sky Uyezd, Olonets Province. *Archive of Kenozersky National Park*. Archive fund 1, record 8, case 401, 402. (In Russ.).

12. Милов Л.В. Великорусский пахарь и особенности российского исторического процесса. М.: РОСПЭН, 2001. 576 с.

Milov L.V. *The Great Russian Plowman and the Peculiarities of the Russian Historical Process*. Moscow, ROSSPEN Publ., 2001. 576 p. (In Russ.).

13. Москаленко С.В., Бобровский М.В. Расселение лесных видов растений из старовозрастных дубрав на брошенные пашни в заповеднике «Калужские засеки» // Изв. СамНЦ РАН. 2012. Т.14, №1(5). С. 1332–1335.

Moskalenko S.V., Bobrovsky M.V. Dispersal of Forest Plant Species from Old-Growth Oak Forests to Abandoned Arable Lands in the Kaluga Zaseki Nature Reserve. *Izvestiya Samarskogo NC RAN* = Izvestia of the Samara Scientific Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, vol. 14, no. 1(5), pp. 1332–1335. (In Russ.).

14. Наквасина Е.Н., Голубева Л.В. Идентификация постагрогенных лесов в национальном парке «Кенозерский» // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2015. № 4. С. 75–82.

Nakvasina E.N., Golubeva L.V. Identification of Post-agroforests in the Kenozersky National Park. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta, Seriya Estestvennye nauki* = Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Ser. "Natural Sciences", 2015, no. 4, pp. 75–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2015.4.75>

15. Пашкевич О. Агрокультурное наследие: истоки, реалии, будущее // Наука и инновации. 2020. № 9(211). С. 37–42.

Pashkevich O. Agrocultural Heritage: Origins, Realities, Future. *Nauka i innovacii* = Science and Innovation, 2020, no. 9(211), pp. 37–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-9-37-42>

16. Пояснительная записка к материалам лесоустройства национального парка «Кенозерский». Архангельск: Арханг. фил. ФГУП «Рослесинфорг», 2014. 170 с.

Explanatory Note to the Forest Inventory Materials of the Kenozersky National Park. Arkhangelsk, Arkhangelsk Branch of FSUE "Roslesinforg", 2014. 170 p. (In Russ.).

17. Томилов Н.А. Этническая экология, экологическая история и области природно-средовой культуры // Вестн. Омск. ун-та. Сер.: Ист. науки. 2016. № 2(10). С. 88–93.

Tomilov N.A. Ethnic Ecology, Ecological History, and Areas of Natural and Environmental Culture. *Vestnik Omskogo universiteta, Ser. Istoricheskie nauki* = Bulletin of Omsk University. "Historical Sciences" series, 2016, no. 2(10), pp. 88–93. (In Russ.).

18. Трапезникова О.Н., Тормосова Н.И. Историко-геоэкологический анализ освоения Русского Севера в условиях развития карстового процесса (на примере Каргополья) // Геоэкология. Инж. геология, гидрогеология, геоэкология. 2019. № 3. С. 52–62.

Trapeznikova O.N., Tormosova N.I. Historical and Geoecological Analysis of the Development of the Russian North in the Conditions of Karst Process Development (on the example of Kargopolye). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* = Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology, 2019, no. 3, pp. 52–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019352-62>

19. Третьяков С.В., Коптев С.В., Неверов Н.А., Новикова Н.С. Сохранение агрокультурных ландшафтов и устойчивое управление ими в Каргопольском секторе Кенозерского национального парка // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014. № 3. С. 40–47.

Tretyakov S.V., Koptev S.V., Neverov N.A., Novikova N.S. Preservation of Agricultural Landscapes and their Sustainable Management in the Kargopol Sector of the Kenozersky National Park. *Bulletin of PSU. Natural Sciences series*, 2014, no. 3, pp. 40–47. (In Russ.).

20. Трубин Д.В. Агрофорест: пашня и лес в неразрывной связи // Эко-потенциал. 2016. № 2(14). С. 12–21.

Trubin D.V. Agroforest: Arable Land and Forest in an Inseparable Bond. *Ekopotencial* = Ecopotential, 2016, no. 2(14), pp. 12–21. (In Russ.).

21. SASGIS Веб-картография и навигация. SAS Планета. Режим доступа: <http://www.sasgis.org/sasplaneta/> (дата обращения: 22.07.20).

Web mapping and navigation. SAS Planet. (In Russ.).

22. Broughton R.K., Bullock J.M., George C., Hill R.A., Hinsley S.A., Maziarz M. et al. Long-Term Woodland Restoration on Lowland Farmland Through Passive Rewilding. *PLoS ONE*, 2021, vol. 16, no. 6. Art. no. e0252466. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252466>

23. Clark J.D., Johnson A.H. Carbon and Nitrogen Accumulation in Post-Agricultural Forest Soils of Western New England. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2011, no. 75(4), pp. 1530–1542. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0180>

24. Cramer V., Hobbs R.J. Old Fields: Dynamics and Restoration of Abandoned Farmland. *Society for Ecological Restoration International, Island Press, Washington, Covelo, London*, 2007. 352 p.

25. D'Orangeville L., Bouchard A., Cogliastro A. Unexpected Seedling Growth in the Understory of Post-agricultural Forests from Eastern Canada. *Annals of Forest Science*, 2011, no. 68, pp. 759–769. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0073-3>

26. Gibson D.J., Middleton B.A., Foster K., Honu Y.A.K., Hoyer E.W., Marilyn M. Species Frequency Dynamics in an Old-Field Succession. Effects of Disturbance, Fertilization and Scale. *Journal of Vegetation Research*, 2005, no. 16(4), pp. 415–422. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02381.x>

27. Kopecký M., Vojta J. Land-use Legacies in Post-agricultural Forests in the Doupovské Mountains, Czech Republic. *Applied Vegetation of Science*, 2009, vol. 12, no. 2, pp. 251–260. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01023.x>

28. Macdonald D.V., Crabtree J.R., Wiesinger G., Dax T., Stamou N., Fleury P., Gutierrez Lazpita J.A., Gibon A. Agricultural Abandonment in Mountain Areas of Europe: Environmental Consequences and Policy Response. *J. Environ. Manag.*, 2000, vol. 59(1), pp. 47–69. <https://doi.org/10.1006/jema.1999.0335>

29. Naaf T., Kolk J. Colonization Credit of Post-agricultural Forest Patches in NE Germany Remains 130–230 Years After Reforestation. *Biological Conservation*, 2015, vol. 182, pp. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.002>

30. Otero I., Marull J., Tello E., Diana G. L., Pons M., Coll F., Boada M. Land Abandonment, Landscape, and Biodiversity: Questioning the Restorative Character of the Forest Transition in the Mediterranean. *Ecology and Society*, 2015, no. 20(2), pp. 32–40. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07378-200207>

31. Plieninger T., Schaich H. Socialist and Postsocialist Land-use Legacies Determine Farm Woodland Composition and Structure: Lessons from Eastern Germany. *Eur. J. Forest. Res.*, 2014, no. 133, pp. 597–610. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0788-4>

32. Prévosto B., Kuiters L., Bernhardt-Römermann M., Dölle M., Schmidt W., Hoffmann M., Uytvanck J.V., Bohner A., Kreiner D., Stadler J., Klotz S., Brandl R. Impacts of Land Abandonment on Vegetation. Successional Pathways in European Habitats. *Folia Geobot.*, 2011, no. 46, pp. 303–325. <https://doi.org/10.1007/s12224-010-9096-z>

33. Schulp C.J.E., Levers C., Kuemmerle T., Tieskens K.F., Verburg P.H. Mapping and Modelling Past and Future Land Use Change in Europe's Cultural Landscapes. *Land Use Policy*, 2019, vol. 80, pp. 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.030>

34. Sewerniak P. Survey of Some Attributes of Post-agricultural Lands in Polish State. *Forests Ecological Questions*, 2016, no. 22, pp. 9–16. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2015.018>

35. Smit R., Olf H. Woody Species Colonization in Relation to Habitat Productivity. *Plant Ecology*, 1998, no. 139, pp. 203–209. <https://doi.org/10.1023/A:1009750216223>

36. Vellend M., Verheyen K., Flinn K.M., Jacquemyn H. et al. Homogenization of Forest Plant Communities and Weakening of Species–environment Relationships via Agricultural Land Use. *Journal of Ecology*, 2007, no. 95, pp. 565–573. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01233.x>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

Обзорная статья

УДК 582.47:630*32:630*411:630*164

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-42-57

Морфометрические критерии оценки качества контейнерных семян хвойных пород

Е.В. Робонен¹, науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

Н.П. Чернобровкина¹✉, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

А.В. Егорова¹, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

М.И. Зайцева², канд. техн. наук; ResearcherID: [P-2238-2015](https://orcid.org/0000-0003-4209-2815).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-2815>

К.Г. Нелаева¹, аспирант; ResearcherID: [GYJ-7223-2022](https://orcid.org/0000-0002-3283-4451).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

¹Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; er51@bk.ru, chernobrovkina50@bk.ru✉, egorova.anast@mail.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru

²Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; 2003bk@bk.ru

Поступила в редакцию 28.04.22 / Одобрена после рецензирования 03.08.22 / Принята к печати 12.08.22

Аннотация. Качество создаваемых посадкой лесных культур существенно зависит от характеристик посадочного материала. Проведены многочисленные исследования по поиску четких критериев качества семян и разработке методов их количественной оценки для оптимизации режима выращивания. Необходимы показатели посадочного материала, доступные к измерению в условиях питомника, позволяющие прогнозировать успешность создания лесных культур. Цель – обзор исследований, использующих различные морфологические критерии качества посадочного материала хвойных растений, методы определения данных критериев. Пригодность критериев качества посадочного материала определяется эффективностью прогнозирования с их помощью уровня приживаемости (%) и роста после пересадки. Важнейшими морфометрическими характеристиками посадочного материала являются линейные размеры и биомасса всего семянца и его отдельных органов: диаметр у корневой шейки, высота семянца, масса сухого вещества хвои, стебля, корня, надземной части семянца, общее сухое вещество семянца, количество хвои. Эффективными индикаторами качества семян служат морфометрические показатели корней: общая длина, объем, масса, количество боковых корней 1-го, 2-го и 3-го порядка, площадь поверхности корня. Общая длина является достаточно надежным показателем мочковатости, а значит – абсорбирующей поверхности. Для минимизации ошибок при использовании одного или двух признаков разработаны интегрированные индексы качества семян, основанные на двух или нескольких показателях. Широко применяются: коэффициент SQ, равный отношению высоты семянца (см) к его диаметру у корневой шейки (мм); отношение надземной части семянца к массе сухого вещества корня; индекс качества Диксона, рассчитываемый как отноше-

ние общего сухого вещества сеянца к сумме отношений высоты сеянца к диаметру у корневой шейки и массы сухого вещества надземной части хвои к массе сухого вещества корня. Для многих видов наилучшим показателем качества посадочного материала называют диаметр у корневой шейки, отмечается высокий уровень его корреляции с индексом качества Диксона. Высота сеянца оказалась эффективным показателем для анализа только при использовании вместе с диаметром у корневой шейки. При изучении формирования морозостойкости применяют ряд морфологических параметров: зарождение зачатков хвои, размер зародышевых побегов, объем клеток и митотический индекс терминальных зачатков. Несмотря на успехи в тестировании качества посадочного материала и прогнозировании полевых показателей, ни один тест не является универсальным для всех видов древесных растений и условий окружающей среды. В соответствии с концепцией целевых сеянцев применение морфометрических критериев оценки качества сеянцев в практике лесных питомников необходимо для прогнозирования успешности высадки посадочного материала и достижения максимальной предсказуемости результатов при создании высокопродуктивных лесных культур.

Ключевые слова: хвойные, *Pinus*, *Picea*, сеянцы, посадочный материал, морфометрические показатели, индекс качества Диксона

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00192/>.

Для цитирования: Робонен Е.В., Чернобровкина Н.П., Егорова А.В., Зайцева М.И., Нелаева К.Г. Морфометрические критерии оценки качества контейнерных сеянцев хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 42–57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-42-57>

Review article

Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality

*Elena V. Robonen*¹, Research Scientist; ResearcherID: [AAD-1958-2019](https://orcid.org/0000-0001-7926-8672),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7926-8672>

Nadezhda P. Chernobrovkina^{1✉}, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [K-6120-2018](https://orcid.org/0000-0002-9716-003X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9716-003X>

*Anastasiya V. Egorova*¹, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [K-6095-2018](https://orcid.org/0000-0002-1691-1269),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1691-1269>

*Maria I. Zaitseva*², Candidate of Engineering; ResearcherID: [P-2238-2015](https://orcid.org/0000-0003-4209-2815),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-2815>

*Karina G. Nelaeva*¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [GYJ-7223-2022](https://orcid.org/0000-0002-3283-4451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-4451>

¹Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St., 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; er51@bk.ru, chernobrovkina50@bk.ru[✉], egorova.anast@mail.ru, nelaevakg@krc.karelia.ru

²Petrozavodsk State University, Lenin Ave., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; 2003bk@bk.ru

Received on April 28, 2022 / Approved after reviewing on August 3, 2022 / Accepted on August 12, 2022

Abstract. The quality of planted forest crops depends significantly on the qualities of the planting stock. Numerous studies have been carried out to find clear seedling quality criteria and work out methods for their quantitative assessment to optimize the cultivation regime. Indicators of planting stock that are available for measurement under nursery conditions are needed to predict the success of forest crop establishment. This paper provides a review of the studies that applied different morphological criteria to evaluate coniferous planting stock quality and different determination methods. The suitability of planting stock quality indicators is determined by the effectiveness of predicting the outplanting survival rate (%) and growth. The key morphometric attributes of planting stock are the linear dimensions and biomass of whole seedlings and their individual organs: root collar diameter (RCD), seedling height (SH), dry mass of needles (NDM), stem (SBDM), roots (RDM), shoot/aboveground part of the seedling (SDM), seedling's total dry matter (TDM), number of needles (NN). Effective indicators of seedling quality are morphometric indicators of roots: total length (TRL), volume (TRV), dry mass (RDM), number of first- (FOLRN), second- (SOLRN), and third-order (TOLRN) lateral roots, root surface area (TRS). TRL is a fairly reliable indicator of absorbent surface area. To minimize errors in the use of one or two traits, integrated seedling quality indices based on two or more indices have been developed. Widely used indices include: $SQ = SH(\text{cm})/RCD(\text{mm})$; SDM/RDM ratio; Dickson quality index $DQI = TDM / ((SH / RCD) + (SDM / RDM))$. RCD was the most suitable parameter to indicate seedling quality for many species due to its higher correlation level with the Dickson quality index. The SH index proved to be an effective indicator for analysis only when used together with RCD. When studying the formation of frost resistance, a number of morphological parameters are used: initiation of needle primordia, size of primordial shoots, cell volume, mitotic index (MI) of terminal primordia. Despite advances in testing planting stock quality and predicting field performance, not a single test is universally applicable for all woody plant species and environmental conditions. According to the target seedling concept, the application of morphometric criteria for assessing seedling quality in forest nurseries is a prerequisite for predicting outplanting success and maximizing the predictability of the outcomes of high-productivity forest crop planting.

Keywords: conifers, *Pinus*, *Picea*, seedlings, planting stock, morphometric attributes, Dickson quality index

Acknowledgements: The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-26-00192, <https://rscf.ru/project/23-26-00192/>.

For citation: Robonen E.V., Chernobrovkina N.P., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Nelaeva K.G. Morphometric Criteria for Assessing the Containerized Conifers Seedlings Quality. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 42–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-42-57>

В связи с большими объемами рубок хвойных лесов на северо-западе России требуется значительное количество посадочного материала для их восстановления. Качество создаваемых посадкой лесных культур, особенно на первом этапе их роста, существенно зависит от характеристик посадочного материала [29, 42, 43, 49, 63, 67]. Сортировка по высоте и диаметру корневой шейки часто практикуется в питомниках для отделения некачественного посадочного материала в целях повышения эффективности работ по искусственному лесовосстановлению [81]. Использование качественных семян обеспечивает высокие приживаемость и сохранность лесных культур, позволяет снизить густоту посадки, уменьшить затраты на разреживание [17]. Активно внедряется технология выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) [4, 7, 18]. Морфологические показатели и физиологический статус

сеянцев формируются с помощью оптимизации условий выращивания, таких как удобрение, орошение, фотопериод, температура выращивания, вид субстрата, размер и форма контейнеров, обработка регуляторами роста и средствами защиты растений [2, 5, 6, 8, 13, 16, 19, 25, 26, 34, 48, 83].

Для оптимизации режима выращивания сеянцев необходимы четкие критерии оценки их качества [24]. Многочисленные исследования были посвящены поиску критериев качества сеянцев и разработке методов количественной оценки этих параметров [30, 34, 37, 40, 44, 52, 58, 68, 71, 79, 81].

Качественными считают сеянцы, соответствующие определенному уровню приживаемости (%), сохранности (%) и роста после пересадки [34, 37]. При оценке качества посадочного материала питомники нуждаются в объективном показателе, который позволит прогнозировать продуктивность посадочного материала в полевых условиях [36].

Поиски критериев, основанных на морфологических признаках, выявили необходимость подключения биохимических и экофизиологических оценок для корреляции показателей сеянцев, определяемых в условиях питомника, с полевыми характеристиками [34]. Несмотря на успехи в тестировании качества сеянцев и прогнозировании полевых показателей, ни один тест не является универсальным для всех видов и условий окружающей среды [34]. Определение наиболее значимых показателей качества сеянцев конкретного вида и выбор эффективных методов их оценки с учетом специфических условий выращивания является необходимым этапом работы.

Цель – обзор морфометрических критериев качества посадочного материала хвойных пород и методов определения этих критериев.

Критерии оценки качества сеянцев древесных растений. Для оценки качества контейнерных сеянцев древесных растений широко используются морфометрические показатели: линейные размеры и масса целого сеянца, его надземной части, корневой системы, а также отдельных органов. Важную информацию о состоянии посадочного материала позволяют получить экофизиологические и биохимические показатели. Пригодность критериев качества посадочного материала определяется эффективностью прогнозирования с их помощью уровня приживаемости (%), сохранности (%) и роста после пересадки растения [66, 85]. Однако трудности с использованием результатов реальных полевых испытаний для оценки качества посадочного материала обуславливают необходимость оценивать сеянцы, готовые к высадке на лесокультурную площадь, по показателям, доступным к измерению в условиях питомника [36].

Основные морфометрические показатели качества сеянцев. В ряде исследований обнаружена четкая положительная взаимосвязь между морфометрическими показателями и ростом, а также выживаемостью в полевых условиях [33, 66, 78, 82, 84]. К важнейшим морфометрическим показателям посадочного материала древесных растений относятся линейные размеры, биомасса всего сеянца и его отдельных органов: диаметр у корневой шейки, высота сеянца, масса сухого вещества хвои, стебля, корня, надземной части сеянца, общее сухое вещество сеянца, количество хвои. Для измерения биомассы сеянцы делили на побег (стебель + хвоя) и корневую систему [81]. В многочисленных источниках используются разные обозначения этих переменных, единая система аббревиатур пока не сложилась. В табл. 1 приводятся принятые в данной статье и некоторые наиболее используемые обозначения.

Таблица 1

Основные морфометрические показатели качества сеянцев
The main morphometric indicators of seedling quality

IQ*	Русское наименование	Английское наименование
SH	Высота сеянца (см)	Shoot height
RCD	Диаметр корневой шейки (мм)	Root collar diameter
TDM	Сухая масса сеянца (г)	Total dry matter
SDM	Сухая масса побега (г)	Shoot dry matter
RDM	Сухая масса корня (г)	Root dry matter
SBDM	Сухая масса стебля (г)	Stem base dry matter
NN	Количество хвои на побеге	Number of leaves
NDM	Сухая масса хвои (г)	Needle dry matter
SN	Площадь хвои (мм ²)	Needle surface area
RL	Длина корня (мм)	Root length
TRL	Общая длина корня (см)**	Total root length
TRS	Площадь поверхности корня (см ²)**	Root surface area
TRV	Общий объем корня (мм ³)**	Total root volume
BL	Длина почки (мм)	Length of bud
CRL	Длина центрального корня (см)	Length of central root
CRM	Масса центрального корня (г)	Mass of central root
FOLRN	Число боковых корней 1-го порядка	Number of I order lateral roots
FOLRL	Длина боковых корней 1-го порядка (см)	Length of I order lateral roots
FOLR DM	Масса боковых корней 1-го порядка (г)	Mass of I order lateral roots
SOLR N	Число боковых корней 2-го порядка	Number of II order lateral roots
SOLR L	Длина боковых корней 2-го порядка (см)	Length of II order lateral roots
SOLR DM	Масса боковых корней 2-го порядка (г)	Mass of II order lateral roots
TOLR N	Число боковых корней 3-го порядка	Number of III order lateral roots
TOLR L	Длина боковых корней 3-го порядка (см)	Length of III order lateral roots
TOLR DM	Масса боковых корней 3-го порядка (г)	Mass of III order lateral roots
MI	Митотический индекс	Mitotic index

* IQ – обозначение показателя (принято здесь). ** Определяют с использованием сканера и системы анализа изображений WinRHIZO [21].

Хотя морфометрические характеристики могут быть не самыми точными показателями качества сеянцев, они доступнее к использованию, чем физиологические [36]. В сфере лесоводства применяется множество стандартов, основанных на морфологических особенностях. Качество посадочного материала в лесокультурной практике определяют преимущественно по высоте надземной части [1, 3, 9, 12, 14, 15, 82]. Результаты показывают, что выживаемость сеянцев после пересадки для многих видов можно успешно предсказать по исходным морфометрическим характеристикам сеянцев, однако не все исходные характеристики являются хорошими предикторами.

С SH тесно связана как фотосинтетическая способность, так и транспирирующая площадь [23]. Это обуславливает хорошую корреляцию SH с последующим ростом, однако однозначная связь с выживаемостью, особенно

в засушливых местах, не всегда наблюдается [59, 64, 81]. Морфометрические показатели необходимо учитывать при выборе посадочного материала с учетом почвенных условий планируемого под посадку участка. Несмотря на широкое использование, морфометрические показатели не позволяют надежно предсказать выживаемость сеянцев в полевых условиях [45, 71, 76, 79, 81]. Так, высокие саженцы *Picea abies* имели меньшую выживаемость, чем те, которые были ниже, но, первые характеризовались более выраженным последующим ростом [76, 81]. Самые высокие сеянцы *Pseudotsuga menziesii* и *Pinus ponderosa* также показали худшую выживаемость [46, 53].

RCD, как и SH, не всегда связан однозначно с выживаемостью сеянцев на лесокультурной площади, но связан с последующим ростом. Так, RCD сеянцев *Pinus strobus* и *Picea glauca* хорошо коррелировал с высотой 6-летнего подроста [60]. RCD сеянцев *Pinus radiata* D. Don коррелировал с высотой саженцев через 3 года после высадки [22]. В условиях засушливого Средиземноморья выживание *Pinus halepensis* P. было положительно связано с исходным диаметром у корневой шейки сеянцев и общей сухой массой сеянца [82].

Выявление пригодных для прогнозирования результатов посадки морфометрических и физиологических признаков, количественно связанных с высокими показателями приживаемости и дальнейшего роста высаженных сеянцев, имеет большое значение для лесохозяйственной практики [37, 56, 65, 73]. Концепция целевых сеянцев была разработана для прогнозирования успешности высадки посадочного материала, достижения максимальной предсказуемости результатов создания лесных культур [73].

Укоренение во многом зависит от способности сеянцев быстро образовывать новые корни [41]. Показано, что морфология корня (длина, объем, масса, количество боковых корней 1-го, 2-го и 3-го порядка, индекс площади корня и архитектурные параметры) может служить эффективным индикатором качества сеянцев [50]. Большие объем и площадь поверхности корня сеянца обеспечивают лучшее поглощение воды и питательных веществ на ранних стадиях после высадки, особенно во время летней засухи [34, 63, 82]. Сеянцы, выращенные в разных типах контейнеров и на разных видах субстратов, часто значительно различаются по числу, длине и массе боковых корней, степени мочковатости, не имеющей, однако, четкого количественного определения [34]. Общая длина корня является хорошим показателем мочковатости, а значит, и абсорбирующей поверхности [81].

В качестве удобрений для увеличения роста и урожайности растений, пестицидов для борьбы с вредителями и болезнями в лесном хозяйстве используются наноматериалы. Наночастицы могут поглощаться растениями и транспортироваться в их ткани, стимулируя или ингибируя рост [21]. При изучении влияния наночастиц серебра и меди (AgNP и CuNP) на рост сеянцев сосны обыкновенной использовали прежде всего морфометрические показатели SH, RCD, SDM. TRL определяли с помощью сканера, интегрированного с программным обеспечением WinRhizo [21].

Минимальные размеры сеянцев для создания лесных культур в России регламентируются Правилами лесовосстановления (указано в [8] и в ОСТ 56-98-93 «Сеянцы и саженцы основных древесных и кустарниковых пород»). Так, для сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с открытой корневой

системой в зоне средней тайги европейской части Российской Федерации установлены диаметр стволика у корневой шейки не менее 2 мм и высота не менее 8 см. Однако на практике в лесных питомниках сеянцы характеризуются значительным варьированием высоты. Показано, что в партиях стандартных сеянцев экземпляры, при посадке значительно отличавшиеся от средних значений как в меньшую, так и в большую сторону, имели в лесных культурах худшие значения текущих приростов в высоту [10, 11]. Предлагалось рассматривать в качестве критерия качества сеянцев не установленную минимальную высоту, а ее соответствие диапазону, принятому в качестве оптимального для данного региона и типа условий местопроизрастания [10, 11]. Определение верхней границы диапазона оптимума приобретает особую важность в связи с внедрением технологии выращивания посадочного материала с ЗКС, ограничивающей возможность роста корневой системы размерами ячеек [35].

Количественные показатели биомассы сеянца и его органов в конце вегетационного периода характеризуют ростовую активность растения в зависимости от условий или продолжительности выращивания. Сухая масса также тесно коррелирует с ростом после высадки, как и диаметр. Высокий уровень корреляции между сухой массой сеянца и диаметром у корневой шейки выявлен для многих видов (*Pinus taeda*, *Pseudotsuga menziesii*) [71, 80, 81].

Кроме основных, обычно измеряемых параметров изучают ряд других факторов. Важным показателем качества сеянцев является морозостойкость, обеспечивающая их способность выживать и активно вегетировать в полевых условиях. Уровень допустимого переохлаждения определен для растения на каждом этапе развития, морозостойкость считается главной стратегией выживания зимой [75]. Чтобы не погибнуть в зимних условиях в бореальном климате, деревья переходят в состояние прекращения роста, или в состояние покоя. Ответную реакцию растения на пониженные температуры изучают по различным физиолого-биохимическим показателям: рост листьев, биомасса растения, содержание хлорофилла, скорость фотосинтеза и транспирации, относительное содержание воды в тканях, относительный выход электролитов и интенсивность перекисного окисления липидов [20]. Однако и морфометрические показатели могут быть полезны. У многих видов хвойных покой сопровождается образованием терминальной почки и рядом сопутствующих ему морфологических изменений. При изучении процесса формирования морозостойкости сеянцев *Picea mariana* рассматривали ряд морфологических параметров, характеризующих уровень зимнего закалывания: зарождение зачатков хвои, размер зародышевых побегов и объем клеток, терминальную митотическую активность почек по митотическому индексу [31]. При оценке по морфологическим признакам также учитывают форму сеянца, наличие повреждений, размер почки, густоту и цвет хвои, который зависит от вида и времени сезона; ультраструктурные показатели хвои, листьев, побегов и корней [21].

Интегрированные индексы качества сеянцев. С целью минимизации ошибок, которые могут возникнуть при использовании только одного или двух признаков, разрабатывались интегрированные индексы качества сеянцев, основанные на двух или нескольких наиболее значимых морфометрических показателях [36, 38, 83] (табл. 2).

Таблица 2

Интегрированные индексы качества сеянцев хвойных
Integrated index of coniferous seedling quality

№	IQ*	Формула расчета индекса	Источники
1	SQ	SH/RCD	[24, 36, 38, 44, 48, 50, 54, 70, 72, 83]
2	S / R	SDM/RDM	[24, 32, 36, 38, 39, 44, 47, 48, 50, 54, 61, 83]
3	R / S	RDM/SDM	[51, 70]
4	–	SH·RCD / (SDM/RDM)	[36]
5	–	RCD ² / (SDM/RDM)	
6	–	TDM · RCD ² / (SDM/RDM)	
7	–	TDM · RCD ² / (SDM/RDM) ²	
8	–	TDM / (SDM/RDM)	
9	–	TDM / ((SH/RCD) · (SDM/RDM))	
10	DQI	TDM / (SH/RCD+SDM/RDM)	[24, 27, 32, 36, 39, 50, 54, 72, 82, 83]

*Обозначение индекса качества сеянцев (принято здесь).

Из предложенных А. Диксоном с соавторами индексов [36] активно используется № 10. Индексы № 4–9 не нашли широкого применения. Многими исследованиями показано, что соотношения показателей надземной части (длины или биомассы) к соответствующим показателям корневой системы (SDM/RDM или SH/RL) сильно коррелируют с выживаемостью и ростом сеянцев после пересадки [24, 34, 35, 48, 52, 56, 57]. Отношение показателей надземной части к показателям корневой системы было предложено как мера баланса между площадью транспирации (побег) и площадью впитывания воды (корень) для сеянца [69].

Сеянцы с низким значением отношения длины или массы надземной части к соответствующему показателю корневой системы, имеющие небольшую площадь транспирирующей поверхности относительно поглощающей, как правило, обладают повышенной выживаемостью при пересадке в условия дефицита влаги [41, 48, 52]. При высоком дефиците влаги отмечается снижение выживаемости и угнетение начального роста сеянцев хвойных растений после высадки на лесокультурные площади [28, 77]. Это соотношение у сеянцев хвойных обычно больше единицы. Для многих видов хвойных, выращиваемых в лесопитомниках, рекомендуются отношения «побег : корень» SH/RL, не превышающие 2,5 [52]. В условиях малообъемного выращивания ухудшение этой важной характеристики сеянца может стать следствием чрезмерного роста в высоту при ограниченных возможностях роста корневой системы. Периоды весенней засухи, вероятно, станут более частым явлением в связи с глобальным потеплением климата, что необходимо учитывать при совершенствовании методов культивирования посадочного материала, адаптированного к условиям водного дефицита [55, 74].

Сеянцы с хорошо развитой надземной частью, большой площадью фотосинтезирующей поверхности, напротив, имеют преимущество на влажных участках с жесткой вегетативной конкуренцией за свет. Их можно рекомендовать для создания лесных культур на вырубках ельников, сосняков черничных и

кисличных, а также производных древостоев, где основную угрозу культурам представляет интенсивно развивающаяся травянистая растительность [8]. Сеянцам, предназначенным для высадки на орошаемые участки при создании плантаций в условиях аридного климата, также не требуются характеристики, обеспечивающие выживание в условия дефицита влаги [62]. Тенденция в пользу низкого соотношения «побеги : корни», способствующего последующему быстрому росту корней, не является желательной для условий орошения [24]. Кроме отношения высоты или массы надземной части сеянца к соответствующему показателю корневой системы были испытаны различные комбинации общей массы сеянцев, массы побегов и корней, диаметра корневой шейки (мм) и высоты (см) [36] (табл. 2).

Широко используются для оценки качества сеянцев древесных растений разных видов: индекс выносливости SQ, выражающий отношение высоты сеянца (см) к диаметру ствола у корневой шейки (мм); отношение сухой массы надземной части к сухой массе корней SDM/RDM и индекс качества Диксона DQI [24, 36] (табл. 3).

Таблица 3

**Использование интегрированных индексов в исследованиях
по оценке качества сеянцев хвойных
The use of integrated indices in conifer seedling quality assessment studies**

Вид	IQ	Источники
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bert.) O. Kuntze	SQ, S/R, DQI	[24, 32, 83]
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	SQ, S/R, R/S, DQI	[47, 51, 61, 70]
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	SQ, DQI	[36, 72]
<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.		[72]
<i>Picea rubens</i> Sarg.		
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr.	S/R, DQI	[39]
<i>Pinus brutia</i>	S/R	[51]
<i>Pinus canariensis</i>	SQ, S/R, DQI	[54]
<i>Pinus elliotii</i> var. <i>elliotii</i>	DQI	[27]
<i>Pinus halepensis</i>		[82]
<i>Pinus nigra</i> (Am.)	SQ, S/R, R/S, DQI	[50, 51]
<i>Pinus occidentalis</i> Swartz	SQ, S/R	[48]
<i>Pinus pinaster</i> Aiton	SQ, S/R, DQI	[50]
<i>Pinus resinosa</i> Ait.	SQ, DQI	[72]
<i>Pinus strobus</i>	DQI	[36]
<i>Pinus sylvestris</i> L.	SQ, S/R, R/S, DQI	[47, 50, 61, 70]
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.)	SQ, S/R	[44]

Выживаемость *Pinus halepensis* положительно коррелировала с исходным диаметром корневой шейки сеянцев, общей сухой массой и индексом качества Диксона [82]. Исследование, направленное на выявление корреляций

между переменными роста (RCD, SH, NN, NDM, SDM, RDM, TDM, SDM/RDM) и SQ и индексом качества Диксона у семян *Pinus elliottii*, показало, что RCD и RDM имели наиболее сильную корреляцию с DQI [27]. RCD во многих исследованиях признается наиболее подходящим параметром для определения качества семян из-за его более высокого уровня корреляции с DQI. SH была эффективной для определения качества семян лишь при использовании вместе с RCD. Интегрированные индексы применяются для оценки качества не только семян, но и укорененных черенков. При исследовании сезонных изменений холодостойкости укорененных черенков ели ситхинской (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) в качестве критериев качества посадочного материала использовали отношение SDM/RDM и коэффициент Диксона [39].

Заключение

Качество создаваемых посадкой лесных культур существенно зависит от характеристик посадочного материала. Для оценки качества семян древесных растений широко используются морфометрические показатели: диаметр у корневой шейки, высота семянца, масса сухого вещества хвои, стебля, корня, надземной части семянца, общее сухое вещество семянца, количество хвои, длина, объем, масса и количество боковых корней 1-го, 2-го и 3-го порядка, общая площадь поверхности и объем корня.

Многими исследованиями диаметр у корневой шейки признается наиболее приемлемым показателем. Высота семянца эффективна для определения качества семян только при использовании совместно с диаметром у корневой шейки. Предлагалось рассматривать как критерий качества семян не превышение установленной минимальной высоты, а соответствие диапазону, принятому в качестве оптимального для данного вида и условий местопрорастания.

Наиболее применяемыми из интегрированных индексов качества семян являются коэффициент SQ, выражающий отношение высоты семянца (см) к диаметру ствола у корневой шейки (мм); отношение сухой массы надземной части к сухой массе корней и индекс качества Диксона.

Отношение показателей надземной части к показателям корневой системы было предложено как мера баланса между площадью транспирации и площадью впитывания воды семянца. Для многих видов семян хвойных пород, выращиваемых в лесопитомниках, рекомендуются значения отношения длины надземной части к длине корня, не превышающие 2,5.

Наряду с физиологическими показателями для определения уровня морозостойкости семян могут использоваться морфологические: зарождение зачатков хвои, размер зародышевых побегов, объем клеток и терминальная митотическая активность почек.

Пригодность критериев качества посадочного материала определяют по эффективности прогнозирования с их помощью уровня приживаемости (%) и роста после высадки на лесокультурную площадь.

Несмотря на успехи в оценке качества семян и прогнозировании полевых показателей, ни один тест не является универсальным для всех видов и условий окружающей среды. В соответствии с концепцией целевых семян использование приведенных в данном обзоре морфометрических критериев

качества семян в практике лесных питомников необходимо для прогнозирования успешности высадки посадочного материала и достижения максимальной предсказуемости результатов при создании высокопродуктивных лесных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баранник А.Б. Лесоводственная эффективность создания культур ели укрупненными сеянцами в таежной зоне // Лесн. хоз-во. 1978. № 4. С. 47–53.
Barannik A.B. Forestry Efficiency of Creating Spruce Crops with Enlarged Seedlings in the Taiga Zone. *Lesnoe hozyajstvo* = Forestry, 1978, no. 4, pp. 47–53. (In Russ.).
2. Бобушкина С.В. Приемы повышения эффективности производства посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой в Архангельской области // Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 6. С. 45–54.
Bobushkina S.V. Efficiency Production Methods of Conifers Ball-rooted Planting Stock in Arkhangelsk Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-45-54>
3. Ган П.А. Влияние возраста и высоты посадочного материала на состояние культур ели тяньшанской // Лесоведение. 1982. № 4. С. 82–85.
Gan P.A. Influence of Age and Height of Planting Material on the Condition of Tianshan Spruce Crops. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1982, no. 4, pp. 82–85. (In Russ.).
4. Гоф А.А. Эффективность создания лесных культур сосны обыкновенной сеянцами с закрытой корневой системой в ленточных борах Алтая: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2020. 18 с.
Gof A.A. *Efficiency of Creation of Scots Pine Forest Plantations by Seedlings with a Closed Root System in Ribbon Forests of the Altai Mountains*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, 2020. 18 p. (In Russ.).
5. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника // Химия раст. сырья. 2017. № 2. С. 171–180.
Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Effects of Application of a Conifer-derived Chemical on the Growth and Elemental Composition of *Pinus sylvestris* L. Seedlings under Forest Nursery Conditions. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of Plant Materials, 2017, no. 2, pp. 171–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017021720>
6. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В., Зайцева М.И. Способ получения водных экстрактов из листьев ивы козьей с учетом суточной динамики их биологической активности для повышения всхожести семян сосны обыкновенной // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 5. С. 394–400.
Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V., Zaytseva M.I. Method of Preparation of Aqueous Extracts from Goat Willow Leaves taking into account the Daily Dynamics of their Biological Activity to Increase the Germination of Common Pine Seeds. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2019, vol. 66, no. 5, pp. 394–400. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330319040031>
7. Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой. СПб.: СПбНИИЛХ, 2000. 293 с.
Zhigunov A.V. *Theory and Practice of Growing Planting Material with a Closed Root System*. Saint-Petersburg, SPbSRIF Publ., 2000. 293 p. (In Russ.).
8. Жигунов А.В., Данилов Д.А., Шестакова Т.А., Неверовский В.Ю. Влияние вида посадочного материала на рост насаждений ели и сосны на постагrogenных землях северо-запада России // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 3(31). С. 30–39.

Zhigunov A.V., Danilov D.A., Shestakova T.A., Neverovsky V.J. Influence of the Type of Planting Material on the Growth of Spruce and Pine Plantations on Post-agrogenic Lands of the North-West of Russia. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Bulletin of the Volga State Technological University. Forest. Ecology. Nature management, 2016, no. 3(31), pp. 30–39. (In Russ.).

9. Маркова И.А. Агротехника и технология создания высокопродуктивных культур ели и сосны промышленными методами на Северо-Западе РСФСР: автореф. ... дис. д-ра с.-х. наук. Л., 1989. 40 с.

Markova I.A. *Agrotechnics and Technology of Creation of Highly Productive Spruce and Pine Crops by Industrial Methods in the North-West of the RSFSR*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Leningrad, 1989. 40 p. (In Russ.).

10. Мерзленко М.Д., Гуртяченко Ю.Г. Оптимальная высота трехлетних сеянцев ели // Лесохоз. информ. 1990. № 11. С. 30–31.

Merzlenko M.D., Gurtyachenko J.G. Optimal Height of Three-year-old Spruce Seedlings. *Lesohozyaistvennaya informatsiya* = Forestry Information, 1990, no. 11, pp. 30–31. (In Russ.).

11. Мерзленко М.Д., Захарова М.И. Влияние высоты сеянцев на рост сосны в лесных культурах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 1. С. 158–162.

Merzlenko M.D., Zakharova M.I. Influence of Seedling Height on Pine Growth in Forest Crops. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 1, pp. 158–162. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.1.158>

12. Мойко М.Ф., Ковалев М.С. Рост лесных культур в зависимости от размеров сеянцев // Лесн. хоз-во. 1977. № 1. С. 52–55.

Moiko M.F., Kovalev M.S. Forest Crop Growth as a Function of Seedling Size. *Lesnoe hozyajstvo* = Forestry, 1977, no. 1, pp. 52–55. (In Russ.).

13. Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Влияние вида кассет на размеры сеянцев сосны с закрытыми корнями и их рост в культурах на Севере // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 5. С. 65–70.

Mochalov B.A., Bobushkina S.V. Effect of Cassette Type on the Size of Closed-root Pine Seedlings and their Growth in Crops in the North. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 5, pp. 65–70. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/978/lkh6.pdf>

14. Мурманская Н.П. Значение сортировки сеянцев сосны в условиях Архангельской области // Защит. лесоразведение и лесн. культуры. 1977. Вып. 4. С. 106–111.

Murmanskaya N.P. Importance of Sorting Pine Seedlings in the Conditions of the Arkhangelsk Region. *Zashitnoe lesorazvedenie i lesnye kultury* = Protective Afforestation and Forest Cultures, 1977, no. 4, pp. 106–111. (In Russ.).

15. Пигарев Ф.Т., Беляев В.В., Сунгуров Р.В. Комплексная оценка качества посадочного материала и его применение на Европейском Севере: метод. указания. Архангельск: АИЛиЛХ, 1987. 14 с.

Pigarev F.T., Belyaev V.V., Sungurov R.V. *Integrated Assessment of Planting Material Quality and its Application in the European North: method. instructions*. Arkhangelsk, Arkhangelskiy institute lesa y lesokhimii Publ., 1987. 14 p. (In Russ.).

16. Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу // Resources and Technology. 2015. Т. 12, № 1. С. 47–76.

Robonen E.V., Zaitseva M.I., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Vasiljev S.B. Experience in the Development and Use of Containerized Substrates for Forest Nurseries. Peat Alternatives. *Resources and Technology* = Resources and Technology, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 47–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2015.3081>

17. Соколов А.И., Харитонов В.А., Пеккоев А.Н., Кривенко Т.И. Сохранность и рост культур сосны, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой в условиях Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 6. С. 46–56.

Sokolov A.I., Kharitonov V.A., Pekkoiev A.N., Krivenko T.I. Preservation and Growth of Pine Crops Created by Planting Material with Closed Root System in Karelia Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 6, pp. 46–56. (In Russ.).

18. Степанов С.А., Зайцева М.И. Выращивание и использование посадочного материала с закрытой корневой системой. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. 32 с.

Stepanov S.A., Zaitseva M.I. *Cultivation and Use of Planting Material with a Closed Root System: a Textbook for Bachelors, Masters and Graduate Students*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2016. 32 p. (In Russ.).

19. Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Егорова А.В., Зайцева М.И., Робонен Е.В. Современные технологии выращивания посадочного материала хвойных пород и пути их совершенствования // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2016. Т. 20, № 6. С. 6–14.

Chernobrovkina N.P., Chhernyshenko O.V., Egorova A.V., Zaitseva M.I., Robonen E.V. Modern Technologies of Growing Planting Material of Coniferous Species and Ways of Improving Them. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 6, pp. 6–14. (In Russ.).

20. Шубаева Т.Г., Икконен Е.Н., Шерудило Е.Г., Тумов А.Ф. Влияние ежедневных кратковременных понижений температуры на теплолюбивые и холодостойкие растения // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 4. С. 266–276.

Shibaeva T.G., Ikkonen E.N., Sherudilo E.G., Titov A.F. Influence of Daily Short-term Temperature Drops on Heat-loving and Cold-resistant Plants. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2019, vol. 66, no. 4. pp. 266–276. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330319040122>

21. Aleksandrowicz-Trzcinska M., Bederska-Błaszczuk M., Szaniawski A., Olchowik J., Studnicki M. The Effects of Copper and Silver Nanoparticles on Container-Grown Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) Seedlings. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 269, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/f10030269>

22. Anstey C. Survival and Growth of 1/0 Radiata Pine Seedlings. *New Zealand Journal of Forestry*, 1971, vol. 16, no. 1, pp. 77–81.

23. Armson K.A., Sadreika V. *Forest Tree Nursery Soil Management and Related Practices*. Ontario, Ministry of Natural Resources and Forestry Publ., 1974. 177 p.

24. Bayala J., Dianda M., Wilson J. Ouedraogo S.J., Sanon K. Predicting Field Performance of Five Irrigated Tree Species Using Seedling Quality Assessment in Burkina Faso, West Africa. *New Forests*, 2009, vol. 38, no. 3, pp. 309–322. <https://doi.org/10.1007/s11056-009-9149-4>

25. Bayley A.D., Kietzka J.W. Stock Quality and Field Performance of *Pinus patula* Seedlings Produced under Two Nursery Growing Regimes During Seven Different Nursery Production Periods. *New Forests*, 1996, no. 13, pp. 337–352.

26. Bigras F.J., D'Aoust A.L. Influence of Photoperiod on Shoot and Root Frost Tolerance and Bud Phenology of White Spruce Seedlings (*Picea glauca*). *Can. J. For. Res.*, 1993, vol. 23, no. 2, pp. 219–228.

27. Binotto A.F., Lúcio A.D., Lopes S.J. Correlations between Growth Variables and the Dickson Quality Index in Forest Seedlings. *Cerne*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 457–464.

28. Bumgarner M.L., Salifu K.F., Jacobs D.F. Subirrigation of *Quercus Rubra* Seedlings: Nursery Stock Quality, Media Chemistry, and Early Field Performance. *HortScience*, 2008, vol. 43, pp. 2179–2185.

29. Cain M.D., Barnett J.P. An 8-year Field Comparison of Naturally Seeded to Planted Container *Pinus Taeda*, With and Without Release. *Can. J. For. Res.*, 1996, vol. 26, no. 7, pp. 1237–1247.

30. Colombo S.J. The Thin Green Line: a Symposium on the State-of-the-art in Reforestation. *Forest Research Information Paper 160*. Canada, Sault Saint Marie, Ministry of Natural Resources and Forestry Publ., 2005. 175 p.

31. Colombo S.J., Glerum C., Webb D.P. Winter Hardening in First-year Black Spruce (*Picea Mariana*) Seedlings. *Physiol. Plant*, 1989, vol. 76, pp. 1–9.

32. Constantino V., Motta A.C.V., Barbosa J.Z., Dolinski M.A., Zanette F., Prior S.A. Initial Growth of *Araucaria Angustifolia* Rootstock in Response to Fertilization with Nitrogen, Phosphorus and Potassium. *Floresta*, 2019, vol. 49, no. 1, pp. 99–108. <http://doi.org/10.5380/rf.v49i1.57467>
33. Cossitt F.M., Rindt C.A., Gunning H.A. Production of Planting Stock. Trees: The Yearbook of Agriculture. *Washington D.C., Govt. Print. Office Publ.*, 1949. 944 p.
34. Davis A.S., Jacobs D.F. Quantifying Root System Quality of Nursery Seedlings and Relationship to Outplanting Performance. *New Forests*, 2005, vol. 30, pp. 295–311.
35. De La Fuente L.M., Ovalle J.F., Arellano E.C., Ginocchio R. Use of Alternative Containers for Promoting Deep Rooting of Native Forest Species Used for Dryland Restoration: The Case of *Acacia Caven*. *iForest*, 2017, vol. 10, pp. 776–782. <http://doi.org/10.3832/ifor2101-010>
36. Dickson A., Leaf A.L., Hosner J.F. Quality Appraisal of White Spruce and White Pine Seedling Stock in Nurseries. *For. Chron.*, 1960, no. 36, pp. 10–13.
37. Duryea M.L. *Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures and Predictive Abilities of Major Tests*. Corvallis, Oregon, Oregon State University, Forest Research Laboratory Publ., 1985. 143 p.
38. Dushimimana C., Magomere T., Mulatya J., Vandenabeele J., Olubayo F., Smaghe G., Werbrouck S.P.O. Variation of Morphological Traits and Quality Indices of Micropropagated *Melia Volkensii* Gurke Clones before Field Planting. *Forests*, 2022, vol. 13, iss. 337, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/f13020337>
39. Fennessy J., O'Reilly C.O., Harper C.P., Thompson D. The Morphology and Seasonal Changes in Cold Hardiness, Dormancy Intensity and Root Growth Potential of Rooted Cuttings of Sitka Spruce. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2000, vol. 73, iss. 5, pp. 489–497. <https://doi.org/10.1093/forestry/73.5.489>
40. Grossnickle S.C. *Ecophysiology of Northern Spruce Species: the Performance of Planted Seedlings*. Ottawa, Canada: NRC Research Press and National Research Council of Canada, 2000. 409 p.
41. Grossnickle S.C. Importance of Root Growth in Overcoming Planting Stress. *New Forests*, 2005, no. 30, pp. 273–294. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-8303-2>
42. Grossnickle S.C. Why Seedlings Survive: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2012, no. 43, pp. 711–738.
43. Grossnickle S.C., MacDonald J.E. Why Seedlings Grow: Influence of Plant Attributes. *New Forests*, 2018, no. 49, pp. 1–34.
44. Haase D.L. Understanding Forest Seedling Quality: Measurements and Interpretation. *Tree Planters' Notes*, 2008, vol. 52, no. 2, pp. 24–30.
45. Hallett R.D. *Reforestation in the Maritimes*. Moncton, New Brunswick, Canadian Forest Service Publ., 1984. 188 p.
46. Hermann R.K. Importance of Top-root Ratios for Survival of Douglas-fir Seedlings. *Tree Planters' Notes*, 1964, no. 64, pp. 7–11.
47. Hernandez Velasco M. *Year-round Production of Forest Seedlings under LED Lamps. Biological and Energetic Implications of Indoor Cultivation*. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2021. 108 p.
48. Hubbel K.L., Ross-Davis A.L., Pinto J.R., Burney O.T., Davis A.S. Toward Sustainable Cultivation of *Pinus occidentalis* Swartz in Haiti: Effects of Alternative Growing Media and Containers on Seedling Growth and Foliar Chemistry. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 422. <https://doi.org/10.3390/f9070422>
49. Ivetić V., Grossnickle S.C., Škoric M. Forecasting the Field Performance of Austrian Pine Seedlings Using Morphological Attributes. *iForest*, 2016, no. 10, pp. 99–107.
50. Kolevska D.D., Dimitrova A., Cokoski K., Basova M. Growth and Quality of *Pinus nigra* (Arn.), *Pinus sylvestris* (L.) and *Pinus pinaster* (Aiton) Seedlings in Two Container Types. *Reforesta*, 2020, no. 9, pp. 21–36. https://doi.org/10.21750/R_EFOR.9.04.78

51. Kostopoulou P., Radoglou K., Papanastasi O.D., Adamidou C. Effect of Mini-plug Container Depth on Root and Shoot Growth of Four Forest Tree Species During Early Developmental Stages. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2011, vol. 35, no. 4, pp. 379–390. <https://doi.org/10.3906/tar-1104-11>
52. Landis T.D., Dumroese R.K., Haase D.L. *The Container Tree Nursery Manual. Vol. 7: Seedling Processing, Storage, and Outplanting*. Washington D.C., U.S. Department of Agriculture Forest Service Publ., 2010. 200 p.
53. Lopushinsky W., Beebe T. *Relationship of Shoot-root Ratio to Survival and Growth of Outplanted Douglas-fir and Ponderosa Pine Seedlings*. U.S.D.A. Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Research Note PNW-274, 1976, 7 p.
54. Luis V.C., Peters J., Gonzalez-Rodriguez A.M., Jimenez M.S., Morales D. Testing Nursery Plant Quality of Canary Island Pine Seedlings Grown under Different Cultivation Methods. *Phyton*, 2004, vol. 44, no. 2, pp. 231–244.
55. Luoranen J., Pikkarainen L., Poteri M., Peltola H., Riikonen J. Duration Limits on Field Storage in Closed Cardboard Boxes before Planting of Norway Spruce and Scots Pine Container Seedlings in Different Planting Seasons. *Forests*, 2019, no. 10, pp. 1126–1146.
56. Mattsson A., Radoglou K., Kostopoulou P., Bellarosa R., Simeone M.C., Schirone B. Use of Innovative Technology for the Production of High-quality Forest Regeneration Materials. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, vol. 25, no. 8, pp. 3–9. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2010.485825>
57. Mexal J., Rangel R.C., Landis T. Reforestation Success in Central Mexico: Factors Determining Survival and Early Growth. *Tree Plant. Notes*, 2008, no. 53, pp. 16–22.
58. Mohammed G.H. The Status and Future of Stock Quality Testing. *New Forests*, 1997, no. 13, pp. 491–514.
59. Mullin R.E., Svaton J. A Grading Study with White Spruce Nursery Stock. *The Commonwealth Forestry Review*, 1972, vol. 51, no. 1, pp. 62–69.
60. Mullin R.E., Christl C. Morphological Grading of White Pine Nursery Stock. *The Forestry Chronicle*, 1982, vol. 58, no. 1, pp. 40–43.
61. Ohlund J., Nasholm T. Growth of Conifer Seedlings on Organic and Inorganic Nitrogen Sources. *Tree Physiology*, 2001, vol. 21, iss. 18, pp. 1319–1326.
62. Oliet J., Planelles R., Arias N.L., Artero F. Soil Water Content and Water Relations in Planted and Naturally Regenerated *Pinus halepensis* Mill. Seedlings During the First Year in Semiarid Conditions. *New Forests*, 2002, no. 23, pp. 31–44.
63. Oliet J.A., Planelles R., Artero F., Valverde R., Jacobs D.F., Segura M.L. Field Performance of *Pinus halepensis* Planted in Mediterranean Arid Conditions: Relative Influence of Seedling Morphology and Mineral Nutrition. *New Forests*, 2009, no. 37, pp. 313–331.
64. Pawsey C.K. Survival and Early Development of *Pinus radiata* as Influenced by Size of Planting Stock. *Australian Forestry Research*, 1972, no. 5, pp. 13–24.
65. Pinto J.R., Marshall J.D., Dumroese R.K., Davis A.S., Cobos D.R. Photosynthetic Response, Carbon Isotopic Composition, Survival, and Growth of Three Stock Types under Water Stress Enhanced by Vegetative Competition. *Can. J. For. Res.*, 2012, vol. 42, no. 2, pp. 333–344.
66. Pomeroy K.B., Green F.K., Burkett L.B. Importance of Stock Quality in Survival and Growth of Planted Trees. *Jour. For.*, 1949, no. 47, pp. 706–707.
67. Puertolas J., Gil L., Pardos J.A. Effects of Nutritional Status and Seedling Size on Field Performance of *Pinus halepensis* Planted on Former Arable Land in the Mediterranean Basin. *Forestry*, 2003, no. 76, pp. 159–168.
68. Puttonen P. Looking for the "Silver Bullet": Can One Test Do It All? *New Forests*, 1997, no. 13, pp. 9–27.
69. Racey G.D., Glerum C., Hutchison R.E. The Practicality of Top-root Ratio in Nursery Stock Characterization. *For. Chron.*, 1983, vol. 59, no. 5, pp. 240–243.

70. Riikonen J., Kettunen N., Gritsevich M., Hakala T., Särkkä L., Tahvonen R. Growth and Development of Norway Spruce and Scots Pine Seedlings under Different Light Spectra. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, no. 121. pp. 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.006>
71. Ritchie G.A. Assessing Seedling Quality. In Duryea M.L., Landis T.D. (eds.). *Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings*. Martinus Nijhoff. Dr. W. Junk. Publishers. Hague, Boston, Lancaster, 1984, pp. 243–259.
72. Roller K.J. *Suggested minimum standards for containerized seedlings in Nova Scotia*. Fredericton, NB, Information Report M-X-69, 1977, pp. 1–18.
73. Rose R., Carlson W.C., Morgan P. *The target seedling concept. General Technical Report RM-200. Roseburg, OR, USA, Proceedings of the Western Forest Nursery Association, 13–17, 1990*, 1990, 8 p.
74. Ruosteenoja K., Markkanen T., Venäläinen A., Räisänen P., Peltola H. Seasonal Soil Moisture and Drought Occurrence in Europe in CMIP5 Projections for the 21st Century. *Clim. Dyn.*, 2018, no. 50, pp. 1177–1192.
75. Ryyppö A., Repo T., Vapaavuori E. Development of Freezing Tolerance in Roots and Shoots of Scots Pine Seedlings at Nonfreezing Temperatures. *Can. J. For. Res.*, 1998, vol. 28, no. 4, pp. 557–565.
76. Schmidt-Vogt H. *Morphological and Physiological Characteristics of Planting Stock: Present State of Research and Research Tasks for the Future*. Proc., IUFRO XVII World Congress. Kyoto, Japan, 1981, pp. 433–446.
77. Shi W., Grossnickle S.C., Li G., Su S., Liu Y. Fertilization and Irrigation Regimes Influence on Seedling Attributes and Field Performance of Pinus Tabuliformis. *Carr. Forestry*, 2019, vol. 92, iss. 1, pp. 97–107. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>
78. Stoeckler J.A., Jones G.W. *Forest Nursery Practices in the Lake States*. Washington, U.S. Government Printing Office Publ., 1956. 124 p.
79. Sutton R.F. Planting Stock Quality and Grading. *Forest Ecology and Management*, 1979, no. 2, pp. 123–132.
80. Switzer G.L., Nelson L.E. Effects of Nursery Fertility and Density on Seedling Characteristics Yield, and Field Performance of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.). *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1963, no. 27, pp. 461–464.
81. Thompson B.E. *Seedling morphological evaluation – what you can tell by looking. Proceedings: Evaluating seedlings quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests*. Proceedings of a workshop held October 16–18, 1984. Corvallis, Oregon, Oregon State University, Forest Research, 1985, pp. 59–71.
82. Tsakalidimi M., Ganatsas P., Jacobs D.F. Prediction of Planted Seedling Survival of Five Mediterranean Species Based on Initial Seedling Morphology. *New Forests*, 2013, no. 44, pp. 327–339. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9339-3>
83. Vieira L.M., Gomes E.N., Brown T.A., Constantino V., Zanette F. Growth and Quality of Brazilian Pine Tree Seedlings as Affected by Container Type and Volume. *Ornamental Horticulture*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 276–286.
84. Wahlenberg W.G. Experiments with Classes of Stock Suitable for Forest Planting in the Northern Rocky Mountains. *Jour. Agric. Res.*, 1928, no. 36, pp. 977–1000.
85. Wakeley P.C. Physiological Grades of Southern Pine Nursery Stock. *Washington, D.C., Proc. Society of American Foresters*, no. 31, 1948. Washington, 1948, pp. 311–322.

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 630:632.51:632.954
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-58-74

Выращивание березы на вырубках с применением гербицидов

А.Б. Егоров, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [G-4300-2015](https://orcid.org/0000-0003-2624-214X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2624-214X>

Л.Н. Павлюченкова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [G-4285-2015](https://orcid.org/0000-0001-8884-2496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-2496>

А.М. Постников[✉], канд. с.-х. наук; ResearcherID: [G-4313-2015](https://orcid.org/0000-0002-8942-8155),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8942-8155>

А.А. Бубнов, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [E-1666-2015](https://orcid.org/0000-0001-5716-3503),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5716-3503>

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Институтский просп., д. 21, Санкт-Петербург, Россия, 194021; herb.egorov@yandex.ru, lipav.172@gmail.com, cucule88@gmail.com[✉], a.bubnov@list.ru

Поступила в редакцию 27.10.22 / Одобрена после рецензирования 23.01.23 / Принята к печати 26.01.23

Аннотация. Береза, являясь одной из основных лесообразующих древесных пород, имеет ценную и востребованную древесину. В производственных лесорастительных условиях естественное возобновление и культуры этой породы испытывают сильную конкуренцию со стороны как травяного покрова, так и нежелательных лиственных пород (осины, ольхи серой и ивы). Без проведения качественных уходов (агротехнических, осветлений) формирование хозяйственно-ценных березняков невозможно. Наиболее эффективным и экономичным является химический метод ухода, предусматривающий использование современных экологически безопасных гербицидов. Однако если в области уходов за хвойными породами (сосна, ель и др.) существуют технологические регламенты и практические рекомендации по применению гербицидов, то в отношении березы такие регламенты и рекомендации в настоящее время отсутствуют. Цель исследования – разработка научно обоснованного метода ухода за естественными молодняками березы с применением селективных гербицидов на землях лесного фонда. Объекты исследования – семенное и вегетативное возобновление березы в молодняках, образовавшихся на сплошных вырубках, а также нежелательная травянистая и древесно-кустарниковая растительность. При закладке опытов и оценке их результатов руководствовались общепринятой методикой испытаний гербицидов в сельском хозяйстве. В полевых производственных и мелкоделячных опытах с гербицидами магнум, магнум супер, мортира и анкор-85 в молодняках с участием березы определялась биологическая эффективность действия препаратов на широкий спектр нежелательной растительности, а также их селективность по отношению к березе. Установлена высокая эффективность действия гербицидов магнум (100...300 г/га) и магнум супер (100...200 г/га) на двудольные виды травянистой растительности и лиственные породы – иву, осину, ольху серую и рябину обыкновенную, а также высокая устойчивость к ним березы при сплошном опрыскивании в период вегетации. Гербициды мортира (100...200 г/га) и анкор-85 (100 г/га) признаны непригодными для уходов за березой.

Установлено, что после однократного применения гербицида магнум в нормах 100 и 200 г/га в смешанных молодняках с доминированием осины, ивы, ольхи серой и участием березы (1–2 ед. состава) формируются древостои с преобладанием последней.

Ключевые слова: береза, молодняк, вырубка, смешанный древостой, сорная растительность, агротехнический уход, осветление, гербициды, эффективность, селективность

Благодарности: Финансирование исследования осуществлялось Федеральным агентством лесного хозяйства по государственному заданию ФБУ «СПбНИИЛХ», утвержденному приказом № 1061 от 25.12.2016.

Для цитирования: Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Постников А.М., Бубнов А.А. Выращивание березы на вырубках с применением гербицидов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 58–74. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-58-74>

Original article

Growing Birch in Clear-cut Areas with Herbicide Application

Alexander B. Egorov, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [G-4300-2015](https://orcid.org/0000-0003-2624-214X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2624-214X>

Lidiya N. Pavluchenkova, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [G-4285-2015](https://orcid.org/0000-0001-8884-2496),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-2496>

Anton M. Postnikov[✉], Candidate of Agriculture; ResearcherID: [G-4313-2015](https://orcid.org/0000-0002-8942-8155),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8942-8155>

Alexander A. Bubnov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [E-1666-2015](https://orcid.org/0000-0001-5716-3503),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5716-3503>

Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Institutsky prospect, 21, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation; herb.egorov@yandex.ru, lipav.172@gmail.com, cucule88@gmail.com[✉], a.bubnov@list.ru

Received on October 27, 2022 / Approved after reviewing on January 23, 2023 / Accepted on January 26, 2023

Abstract. Birch, being one of the main forest-forming tree species, has valuable and sought-after timber. In production forest conditions, natural regeneration and crops of this species experience strong competition from both grass cover and undesirable hardwoods (aspen, gray alder and willow). Without carrying out high-quality maintenance (agrotechnical care, clearing), the formation of economically valuable birch forests is impossible. The most effective and economical is the chemical care method, which involves the use of modern environmentally friendly herbicides. However, if technological regulations and practical recommendations for the use of herbicides have already been developed for the care of coniferous species (pine, spruce and others), then there are currently no such recommendations for birch. The aim of the research is to develop a scientifically based method of caring for natural young birch stands (clearing, agrotechnical care) using selective herbicides on forest fund lands. The objects of research are seed and vegetative regeneration of birch in young stands formed in clear-cut areas, as well as undesirable herbaceous and tree-shrub vegetation. When laying the experiments and evaluating their results, we were guided by the generally accepted methodology for testing herbicides in agriculture. In field production and small-scale experiments with herbicides magnum, magnum super, mortira and anchor-85 in young stands with birch trees, the biological effectiveness of the action of the preparations on a wide range of undesirable vegetation was determined, as well

as their selectivity with respect to birch. High efficiency of herbicides magnum (100–300 g/ha) and magnum super (100–200 g/ha) on dicotyledonous species of herbaceous vegetation and deciduous species – willow, aspen, gray alder and mountain-ash, as well as high resistance of birch to them at continuous spraying during the growing season was established. Herbicides mortira (100–200 g/ha) and anchor-85 (100 g/ha) were recognized as unsuitable for birch care. It was found that after a single application of herbicide magnum at rates of 100 and 200 g/ha in mixed young stands dominated by aspen, willow and gray alder and with participation of birch 1–2 composition units, stands dominated by the latter are formed.

Keywords: birch, young stands, clear cutting, mixed stand, weed vegetation, agrotechnical care, clearing, herbicides, effectiveness, selectivity

Acknowledgements: The study was financially supported by the Federal Agency of Forestry within the state assignment of the Saint Petersburg Forestry Research Institute approved by Order No. 1061 of 25.12.2018.

For citation: Egorov A.B., Postnikov A.M., Bubnov A.A., Pavluchenkova L.N., Partolina A.N. Growing Birch in Clear-cut Areas with Herbicide Application. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 58–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-58-74>

Введение

Береза является важным объектом лесного хозяйства как в эксплуатационном, так и в лесоводственном отношении. Сегодня березовая древесина востребована, широко используется, а ее крупномерные сортименты дефицитны.

Естественное возобновление березы на лесных площадях считалось негативным процессом, так как береза становилась конкурентом для выращиваемых хвойных насаждений, из-за чего эту породу относили к нежелательной (сорной) древесной растительности. В настоящее время разработаны способы регулирования численности березы для формирования оптимальных условий роста хвойных пород на лесных площадях [2, 3, 6]. В ряде случаев из-за невозможности создания лесных культур хвойных пород в богатых лесорастительных условиях задача воспроизводства ценных пород может быть решена за счет семенного возобновления березы.

Береза характеризуется обильным плодоношением, а ее семена имеют большую дальность разлета. Однако возобновление этой породы на сплошных вырубках в зеленомошной и сложной группах типов леса часто сильно осложнено конкуренцией со стороны мощного травяного покрова и быстрорастущих лиственных пород – ивы, осины, ольхи серой и др. Сеянцы 1–3-летнего возраста страдают от негативного воздействия травянистой растительности [14], а сеянцы 2–5-летнего возраста – и от нежелательной древесно-кустарниковой растительности вырубков [7, 13]. Очевидно, что для успешного семенного возобновления березы необходимо регулировать состав и развитие живого напочвенного покрова и конкурентных древесных пород. Для этих целей наиболее перспективным является применение химического метода, который позволяет проводить уход при минимальных трудовых и денежных затратах в сочетании с высокой экологической безопасностью.

Есть данные, свидетельствующие о потенциальной возможности и перспективности использования препаратов на основе метсульфурон-метила для

ухода за березой. Так, ранее в лесных питомниках был зарегистрирован препарат гренч в нормах применения 20–25 г/га для ухода за сеянцами березы [4, 5]. Однако в лесорастительных условиях вырубок таких норм гербицида будет недостаточно для подавления многолетних видов трав. Ранее для лесоводственного ухода за березой на вырубках перспективным был признан препарат эллай (действующее вещество – метсульфурон-метил) в нормах 100–200 г/га, что указано в [14], а также в отчете о научно-исследовательской работе по теме «Разработать комплекс мероприятий по химической борьбе с нежелательными растениями при выращивании березы» (1995). Также сообщается о возможности применения препаратов на основе метсульфурон-метила для ухода за древесными породами, в том числе лиственными [18]. Попытка использования препарата террсан (действующее вещество – сульфометурон-метил) в норме 20 г/га при выращивании лиственных пород в лесных питомниках Белоруссии привела к гибели сеянцев березы повислой [19]. Другие литературные данные о применении гербицидов при выращивании березы отсутствуют.

На основании анализа литературы о применении химического метода ухода в лесном хозяйстве перспективными для экспериментального изучения с целью ухода за березой признаны несколько гербицидов, зарегистрированных для применения в Российской Федерации [15]: магнум (водно-диспергируемые гранулы (ВДГ), 600 г/кг метсульфурон-метила); магнум супер (ВДГ, 450 г/кг трибенурон-метила + 350 г/кг метсульфурон-метила); мортيرا (ВДГ, 750 г/кг трибенурон-метила); анкор-85 (ВДГ, 750 г/кг сульфометурон-метила, калиевая соль).

Химический метод является важным компонентом интегрированной системы защиты растений и регулирования состава нежелательной растительности. В связи с постоянным обновлением ассортимента пестицидов большое значение имеет оценка данных не только об их биологической эффективности, но и об экологической безопасности [10]. Производные сульфонилмочевины – класс химических соединений, к которому принадлежат гербициды нового поколения, проявляющие очень высокую биологическую активность при нормах расхода на 1–2 порядка ниже по сравнению с традиционно применяемыми препаратами. Со времени начала использования этой группы гербицидов в конце 70-х гг. XX в. уделялось большое внимание изучению риска загрязнения окружающей среды и повреждения культивируемых растений [9–12]. Проведенные разными авторами исследования показали, что при pH почвы ниже 7, что характерно для большинства лесных почв, происходит интенсивное разрушение сульфонилмочевин до нетоксичных соединений [1, 16, 17, 20]. Сульфонилмочевины представляют собой уникальный класс до- и послевсходовых гербицидов с высокой эффективностью, избирательностью действия, низкой токсичностью для млекопитающих, рыб и других организмов. При соблюдении всех разработанных регламентов применение гербицидов (в частности – предлагаемых препаратов) группы сульфонилмочевины не представляет опасности для окружающей среды.

Цель – изучить возможность метода ухода за естественными молодняками березы (осветление, агротехнический уход) с применением селективных гербицидов на землях лесного фонда.

Объекты и методы исследования

Полевые экспериментальные исследования выполнялись в 2020–2022 гг. в Гатчинском районе Ленинградской области, который входит в Балтийско-Белозерский таежный район таежной зоны. Применялись гербициды, разрешенные в Российской Федерации [15]. Варианты их использования и даты обработок приведены ниже. При закладке опытов руководствовались «Методическими указаниями по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве» [8]. Предварительной подготовки почвы не проводилось. Повторность опытов – 2-кратная. Биологическую эффективность действия гербицидов на травянистую растительность определяли проективно-количественным методом по снижению (в процентах) проективного покрытия почвы травянистыми растениями по отношению к контролю (без обработки), для чего закладывали временные учетные площадки. Эффективность действия химических препаратов на нежелательные листовые древесные породы в 1-й год после обработки оценивалась по отмиранию листьев, на 2-й год – по отмиранию стволов (в процентах от их общего количества).

Полевой мелкоделяночный опыт 1 был заложен 8 июня 2021 г. на сплошной вырубке 2-летней давности, в средней степени заросшей травянистой и древесно-кустарниковой растительностью, на участке площадью 1000 м². Тип лесорастительных условий – черничный. Почва дерново-подзолистая легкосуглинистая с содержанием гумуса в горизонте А₁ 2,5 %, характеризующаяся временным избыточным увлажнением.

Полевой производственный опыт 2 был заложен 1 июля 2021 г. на сплошной вырубке 4-летней давности, в сильной степени заросшей нежелательной травянистой и древесно-кустарниковой растительностью, на участке площадью 800 м², в кисличном типе леса. Почва дерново-подзолистая легкосуглинистая с содержанием гумуса в горизонте А₁ 3,6 %. Условия дренированные.

Полевой производственный опыт 3 заложен 29 июня 2020 г. на сплошной вырубке 3-летней давности, в сильной степени заросшей травянистой и древесно-кустарниковой растительностью, на участке площадью 800 м². Тип лесорастительных условий – черничный. Почва дерново-подзолистая легкосуглинистая с содержанием гумуса в горизонте А₁ 3,1 %. Условия дренированные.

В 1-м опыте опрыскивание проведено с применением ранцевого ручного опрыскивателя «Соло» с расходом рабочей жидкости 300 л/га, во 2-м и 3-м опытах – ранцевого моторного опрыскивателя «Штиль» с расходом рабочей жидкости 100–120 л/га.

В опытах 1 и 2 к моменту химической обработки соотношение однодольных и двудольных видов было примерно одинаковым, в опыте 3 преобладали двудольные виды травянистых растений. Отмечены следующие виды двудольных: вероника лекарственная (*Veronica officinalis* L.), брусника (*Rodococcum vitis-idaea* (L.) Avror.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), костяника (*Rubus saxatilis* L.), таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), бодяк разнолистный (*Cirsium heterophyllum* (L.) Hill), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.), купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.)

Hoffm.), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt), ландыш майский (*Convallaria majalis* L.), лапчатка прямостоячая (*Potentilla erecta* L.), ястребинка (виды) (*Hieracium spp.*). Однодольные: вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth), вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* L.), луговик извилистый (*Avenella flexuosa* (L.) Drejer), щучка дернистая (*Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv.), полевица обыкновенная (*Agrostis capillaries* L.), бор развесистый (*Milium effusum* L.), ситник (виды) (*Jungus spp.* L.), осока (виды) (*Carex spp.* L.). Из древесных растений кроме березы (виды) (*Betula spp.*) в 1-м и 2-м опытах присутствовали осина (*Populus tremula* L.), ива (виды) (*Salix spp.*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), а в 3-м опыте кроме названных видов произрастала ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench).

В целом вегетационные сезоны 2021–2022 гг. были благоприятными для роста и развития нежелательной растительности и действия на нее гербицидов. Травянистые растения и листовенные древесно-кустарниковые породы в местах проведения полевых опытов не испытывали какого-либо серьезного и длительного стресса, связанного с аномальными метеоусловиями.

Результаты исследования и их обсуждение

В опыте 1 в смешанном молодняке с участием березы в день применения гербицидов (8 июня 2021 г.) общее проективное покрытие почвы травянистой растительностью составляло 45 %, в том числе однодольными видами – 30 %, двудольными – 15 %. Видовой состав и развитие сорняков на всех делянках опыта были сходны. В дальнейшем в контрольном варианте в июле–сентябре проективное покрытие почвы травами достигло 55...75 %, доля двудольных видов составила 31...42 %, а однодольных – 24...33 % (табл. 1).

Через 41 день после применения гербицида магнум наблюдались повреждения разной степени и частичное отмирание практически всех видов двудольных травянистых растений (рис. 1). При увеличении нормы применения препарата от 100 до 200 г/га эффективность подавления двудольных видов повышалась с 81 до 90 %. Однако увеличение нормы применения гербицида до 300 г/га не сопровождалось ростом эффективности. Полного отмирания многолетних двудольных видов не отмечено ни в одном из вариантов с внесением этого гербицида. Влияние препарата магнум во всех нормах на однодольные виды трав, в первую очередь – на многолетние злаки, проявилось в стимулировании их роста и развития в условиях подавления двудольных видов. С повышением нормы препарата проективное покрытие почвы однодольными видами увеличилось до 29...35 % (в контроле – 24 %). Магнум супер действовал на травянистую растительность несколько слабее препарата магнум в тех же нормах применения – двудольные травы были подавлены на 74...84 %, а количество однодольных видов также несколько превышало уровень контроля. Гербицид мортира значительно уступал перечисленным выше препаратам по действию на двудольные виды, однако вызвал некоторое подавление роста однодольных трав, снизив их проективное покрытие на 4...8 % по сравнению с контролем.

Таблица 1

**Действие гербицидов на нежелательную травянистую растительность
в смешанном молодняке с участием березы (опыт 1, обработка 08.06.2021)
The effect of herbicides on undesirable herbaceous vegetation in mixed young
stands with birch trees (experiment 1, treatment 06/08/2021)**

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие травянистых растений, %			Снижение проективного покрытия, % к контролю		
		общее	однодольных	двудольных	общего	однодольных	двудольных
Магнум, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	35	29	6	36	-21	81
	14.09.2021	48	46	2	36	-39	95
	16.08.2022	64	59	5	21	-55	88
Магнум, ВДГ, 200 г/га	19.07.2021	38	35	3	31	-46	90
	14.09.2021	56	55	1	25	-67	98
	16.08.2022	66	62	4	19	-63	91
Магнум, ВДГ, 300 г/га	19.07.2021	36	33	3	35	-38	90
	14.09.2021	51	50	1	32	-52	98
	16.08.2022	63	58	5	22	-52	88
Магнум супер, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	38	30	8	31	-25	74
	14.09.2021	61	59	2	19	-79	95
	27.08.2022	72	64	8	11	-68	81
Магнум супер, ВДГ, 200 г/га	19.07.2021	35	30	5	36	-25	84
	14.09.2021	60	59	1	20	-79	98
	16.08.2022	70	65	5	14	-71	88
Мортира, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	36	22	14	35	8	55
	14.09.2021	56	46	10	25	-39	76
	16.08.2022	69	54	15	15	-42	65
Мортира, ВДГ, 200 г/га	19.07.2021	35	23	12	36	4	61
	14.09.2021	59	51	8	21	-55	81
	16.08.2022	71	58	13	12	-53	70
Анкор-85, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	27	19	8	51	21	74
	14.09.2021	11	6	5	85	82	88
	16.08.2022	35	17	18	57	55	58
Анкор-85, ВДГ, 300 г/га	19.07.2021	20	14	6	64	42	81
	14.09.2021	6	3	3	92	91	93
	16.08.2022	28	13	15	65	66	65
Контроль	19.07.2021	55	24	31	-	-	-
	14.09.2021	75	33	42	-	-	-
	16.08.2022	81	38	43	-	-	-

Анкор-85 (100 и 300 г/га) через месяц после обработки вызвал повреждения или частичное отмирание травянистой растительности – как однодольных, так и двудольных видов (табл. 1). На двудольные виды он подействовал несколько менее эффективно по сравнению с гербицидом магнум в таких же нормах и на одном уровне с препаратом магнум супер.

*a**б*

Рис. 1. Опыт 1 (обработка 08.06.2021, фото 19.07.2021): *a* – магнум, 100 г/га; *б* – контроль (без обработки)
 Fig. 1. Experiment 1 (chemical treatment 08.06.2021, photo 19.07.2021): *a* – magnum 100 g/ha; *б* – control (without treatment)

Так, анкор-85 в нормах 100 и 300 г/га подавил двудольные виды на 74...81 % соответственно; магнум в таких же нормах – на 81...90 %; магнум супер в нормах 100 и 200 г/га – на 74...84 %. Анкор-85 в отличие от других гербицидов в опыте довольно эффективно подействовал и на однодольные виды трав, снизив их проективное покрытие на 21...42 %.

В сентябре действие на двудольные виды гербицидов магнум, магнум супер и мортара во всех нормах применения сохранилось на том же уровне (табл. 1), что и летом. Проективное покрытие однодольных видов, преимущественно злаков, увеличилось до 46...59 % (в контроле – 33 %). Эффективность действия анкора-85 на все группы травянистых растений существенно выросла.

В конце следующего после обработки вегетационного сезона во всех вариантах с гербицидами, кроме анкора-85, значительно повысилось проективное покрытие почвы однодольными видами – до 54...65 % за счет вейника тростникового, луговика извилистого, щучки дернистой, ситника и осоки. Началось постепенное и медленное отрастание некоторых двудольных видов – бодяка разнолистного, таволги вязолистной, иван-чая узколистного и малины обыкновенной (проективное покрытие составило 4...15 %). Эффективность действия препарата анкор-85 снизилась с 85...92 до 57...65 %, причем начали восстанавливаться как однодольные, так и двудольные виды трав (табл. 1).

Через 41 день после обработки магнум вызвал отмирание 81...97 % листьев у осины, 69...85 % – у ивы, 95...98 % – у рябины обыкновенной (табл. 2). Магнум супер показал несколько менее высокую эффективность – 75...86 %.

На следующий год магнум и магнум супер во всех нормах обеспечили полное отмирание деревьев осины, ивы и ольхи серой. Береза в этих вариантах – без повреждений, в фазе активного линейного роста побегов. Мортара и анкор-85 вызвали отмирание только части деревьев лиственных пород.

Препарат мортара значительно слабее подействовал на перечисленные лиственные породы (9...39 %). Наибольшую устойчивость к этим гербицидам из рассматриваемых в опыте лиственных древесно-кустарниковых пород проявила береза (виды). Незначительные повреждения наблюдались только в вариантах с высокими нормами препаратов магнум (200 и 300 г/га) и магнум супер (200 г/га). Препарат мортара в нормах 100 и 200 г/га не вызвал видимых повреждений березы. Анкор-85 оказал умеренное арборицидное действие на все лиственные породы, вызвав отмирание 19...39 % листьев в зависимости от нормы применения и древесной породы.

Таблица 2

Действие гербицидов на березу и нежелательную древесно-кустарниковую растительность в смешанном молодняке (опыт 1, обработка 08.06.2021)
The effect of herbicides on birch and undesirable trees and shrubs in mixed young stands (experiment 1, treatment 06/08/2021)

Вариант опыта	Дата учета	Доля отмерших листьев, %			
		береза (виды)	осина	ива (виды)	рябина обыкновенная
Магнум, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	0	81	69	95
	14.09.2021	0	100	100	100
	16.08.2022	0	100	100	100
Магнум, ВДГ, 200 г/га	19.07.2021	5	96	79	98
	14.09.2021	0	100	100	100
	16.08.2022	0	100	100	100
Магнум, ВДГ, 300 г/га	19.07.2021	14	97	85	98
	14.09.2021	4	100	100	100
	16.08.2022	0	100	100	100
Магнум супер, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	0	81	86	75
	14.09.2021	0	100	100	89
	16.08.2022	0	100	100	100
Магнум супер, ВДГ, 200 г/га	19.07.2021	12	76	82	82
	14.09.2021	0	100	100	100
	16.08.2022	0	100	100	100
Мортира, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	0	27	35	12
	14.09.2021	0	38	47	22
	16.08.2022	0	46	75	55
Мортира, ВДГ, 200 г/га	19.07.2021	0	32	39	9
	14.09.2021	0	42	48	24
	16.07.2022	0	51	68	63
Ан-кор-85, ВДГ, 100 г/га	19.07.2021	29	19	31	35
	14.09.2021	64	59	51	45
	16.08.2022	35	44	36	36
Ан-кор-85, ВДГ, 300 г/га	19.07.2021	39	28	37	32
	14.09.2021	69	71	66	53
	16.08.2022	30	47	29	41

В сентябре в год обработки во всех трех вариантах с гербицидом магнум отмирание листьев у осины, ивы и рябины обыкновенной составило 100 %, береза сохранилась без повреждений при нормах 100 и 200 г/га и находилась в фазе активного линейного роста побегов. Лиственные древесно-кустарниковые породы по степени возрастания их устойчивости к гербициду магнум расположились следующим образом: рябина обыкновенная – ива – осина – береза. Магнум супер также продемонстрировал высокую эффективность действия на нежелательные лиственные древесно-кустарниковые породы и селективность по отношению к березе. Анкор-85 в норме применения 100 г/га вызвал отмира-

ние 45...64 % листьев древесно-кустарниковых пород, в норме 300 г/га – 53...71 %. Все лиственные породы проявили близкую чувствительность к этому гербициду. В то же время полного отмирания листьев, как и по данным предыдущих учетов, не зафиксировано ни у одной породы.

В опыте 2 в смешанном молодняке с участием березы в день применения гербицидов (1 июля 2021 г.) общее проективное покрытие почвы травянистой растительностью составляло 75...77 %, в том числе однодольными видами – 39...41 %, двудольными – 35...38 %. Видовой состав и фаза развития сорняков на всех делянках опыта были сходны. В дальнейшем в контрольном варианте в июле–сентябре проективное покрытие почвы травами достигло 77...79 %, двудольных видов было 36...39 %, а однодольных – 40...41 % (табл. 3).

Таблица 3

**Действие гербицидов на нежелательную травянистую растительность
в смешанном молодняке с участием березы (опыт 2, обработка 01.07.2021)
The effect of herbicides on undesirable herbaceous vegetation
in mixed young stands with birch trees (experiment 2, treatment 07/01/2021)**

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие травянистых растений, %			Снижение проективного покрытия, % к контролю		
		общее	однодольных	двудольных	общее	однодольных	двудольных
Магнум, ВДГ, 100 г/га	31.07.2021	51	39	12	34	5	67
	11.09.2021	54	47	7	32	-18	82
	17.08.2022	69	55	14	12	-41	64
Магнум, ВДГ, 200 г/га	31.07.2021	48	37	11	38	10	69
	11.09.2021	56	49	7	29	-23	82
	17.08.2022	67	56	11	14	-44	72
Анкор-85, ВДГ, 100 г/га	31.07.2021	55	30	25	29	27	31
	11.09.2021	19	11	8	76	73	79
	17.08.2022	34	18	16	56	54	59
Контроль	31.07.2021	77	41	36	-	-	-
	11.09.2021	79	40	39	-	-	-
	17.08.2022	78	39	39	-	-	-

Через месяц после применения гербицида магнум в двух вариантах концентрации наблюдались повреждения разной степени и частичное отмирание практически всех видов двудольных травянистых сорняков – эффективность действия составила 67...69 %, т. е. увеличение нормы гербицида с 100 до 200 г/га не сопровождалось повышением эффективности.

Не отмечено существенного влияния гербицида магнум на однодольные виды трав (в первую очередь, на многолетние злаки) – проективное покрытие было всего на 5...10 % ниже уровня контроля, а внешние повреждения отсутствовали.

Анкор-85 (100 г/га) вызвал только незначительные повреждения травянистых видов – как однодольных, так и двудольных. На двудольные виды этот гербицид действовал значительно менее эффективно по сравнению с препаратом магнум в такой же норме (100 г/га). В отличие от магнума анкор-85 эффективно подействовал и на однодольные виды трав, снизив их проективное покрытие на 27 % (табл. 3).

В конце 1-го вегетационного сезона эффективность действия препарата магнум на двудольные травы сохранилась на прежнем, достаточно высоком уровне (82 %). Проективное покрытие почвы однодольными видами составило 47...49 % (в контроле – 40 %). Существенной разницы по действию на травянистую растительность в вариантах с нормами этого гербицида 100 и 200 г/га не наблюдалось. Эффективность действия на все виды травянистой растительности препарата анкор-85 увеличилась и достигла 76 % (табл. 3).

В конце следующего вегетационного сезона во всех опытных вариантах отмечено некоторое увеличение проективного покрытия травянистыми растениями, как однодольными, так и двудольными. В вариантах с препаратом магнум по-прежнему доминировали однодольные виды – луговик извилистый, вейник тростниковидный, вейник наземный, щучка дернистая. Эффективность действия препарата анкор-85 снизилась с 76 до 56 %, причем показатели эффективности подавления двудольных и однодольных видов были очень близки.

Через месяц после обработки магнум в норме применения 100 г/га вызвал отмирание 35...84 %, а в норме 200 г/га – 58...95 % листьев у осины, ивы и рябины обыкновенной (табл. 4). Наибольшую устойчивость к этому гербициду из лиственных древесно-кустарниковых пород проявила береза. В варианте с высокой нормой применения гербицида (200 г/га) отмирание ее листьев составило всего 6 %.

Таблица 4

Действие гербицидов на березу и нежелательную древесно-кустарниковую растительность в смешанном молодняке (опыт 2, обработка 01.07.2021)
The effect of herbicides on birch and undesirable trees and shrubs in mixed young stands (experiment 2, treatment 07/01/2021)

Вариант опыта	Дата учета	Доля отмерших листьев, %			
		береза (виды)	осина	ива (виды)	рябина обыкновенная
Магнум, ВДГ, 100 г/га	31.07.2021	0	35	49	84
	11.09.2021	0	92	100	100
	17.08.2022	0	96	100	100
Магнум, ВДГ, 200 г/га	31.07.2021	6	58	65	95
	11.09.2021	0	98	100	100
	17.08.2022	0	100	100	100
Анкор-85, ВДГ, 100 г/га	31.07.2021	35	29	25	49
	11.09.2021	65	59	52	91
	17.08.2022	35	38	43	86

Анкор-85 проявил довольно низкую арборицидную активность, вызвав отмирание листьев в пределах 25...49 % в зависимости от древесной породы. Наиболее чувствительна к нему оказалась рябина обыкновенная.

В конце 1-го вегетационного сезона в вариантах с гербицидом магнум наблюдалось полное отмирание листьев у ивы и рябины обыкновенной, повреждений березы не отмечено. Анкор-85 (100 г/га) вызвал отмирание 52...91 % листьев у всех лиственных древесных пород. Наибольшую чувствительность проявила рябина обыкновенная, наиболее устойчивой была ива.

В августе следующего года в варианте с гербицидом магнум (200 г/га) зафиксировано полное отмирание нежелательных древесных пород – осины, ивы и рябины; береза признаков повреждений не имела (табл. 4). При норме гербицида 100 г/га не полностью погибла только осина (96 %). Анкор-85 вызвал отмирание 35...86 % деревьев всех лиственных пород, включая березу.

В опыте 3 в смешанном молодняке с участием березы в день применения гербицидов (29 июня 2020 г.) общее проективное покрытие почвы травянистой растительностью составляло 79...82 %, в том числе однодольными видами – 32...36 %, двудольными – 42...45 %. Видовой состав и фаза развития сорняков на всех делянках опыта были схожими. В августе 2020 г. в контрольном варианте общее проективное покрытие почвы травами составляло 65 %, двудольными видами – 30 %, а однодольными – 35 % (табл. 5).

Таблица 5

**Действие гербицидов на нежелательную травянистую растительность
в смешанном молодняке с участием березы (опыт 3, обработка 29.06.2020)
The effect of herbicides on undesirable herbaceous vegetation
in mixed young stands with birch trees (experiment 3, treatment 06/29/2020)**

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие травянистых растений, %			Снижение проективного покрытия, % к контролю		
		общее	однодольных	двудольных	общего	однодольных	двудольных
Магнум, ВДГ, 100 г/га	06.09.2020	71	64	7	-9	-83	77
	21.08.2021	63	52	11	17	-58	74
	15.09.2022	58	48	10	18	-55	75
Магнум, ВДГ, 200 г/га	06.09.2020	72	67	5	-11	-91	83
	21.08.2021	67	58	9	12	-76	79
	15.09.2022	66	54	12	7	-74	70
Ан- кор-85, ВДГ, 100 г/га	06.09.2020	15	5	10	77	86	67
	21.08.2021	26	12	14	66	64	67
	15.09.2022	59	31	28	17	0	30
Кон- троль	06.09.2020	65	35	30	-	-	-
	21.08.2021	76	33	43	-	-	-
	15.09.2022	71	31	40	-	-	-

В конце 1-го вегетационного сезона эффективность действия препарата магнум на двудольные травы сохранилась на достаточно высоком уровне (77...83 %). Проективное покрытие почвы однодольными видами составило 64...67 % (в контроле – 35 %). Существенной разницы по действию на травянистую растительность в вариантах с нормами этого гербицида 100 и 200 г/га не наблюдалось. Эффективность действия препарата анкор-85 на все виды травянистой растительности незначительно увеличилась и составила 77 % (табл. 5).

В следующем вегетационном сезоне в вариантах с гербицидом магнум было обеспечено полное доминирование однодольных видов трав и высокая степень подавления двудольных. Общее проективное покрытие почвы травами было несколько ниже по сравнению с контролем. В варианте с гербицидом ан-

кор-85 сохранилась относительно высокая степень подавления всех видов травянистой растительности – 66...72 % (табл. 5).

В 2022 г. в вариантах с гербицидом магнум существенных изменений в составе и обилии травянистой растительности не наблюдалось. В варианте с анкором-85 отмечено активное разрастание травянистой растительности на фоне снижения конкуренции со стороны лиственных пород, включая березу.

В сентябре 1-го вегетационного сезона действие гербицида магнум на иву, осину, ольху серую и рябину обыкновенную было максимальным. В варианте с нормой применения 200 г/га отмирание листьев у ивы, осины и рябины обыкновенной составило 100 %. Несколько более высокую устойчивость проявила ольха серая (78...95 %). Береза находилась в фазе активного линейного роста побегов и без видимых признаков повреждений гербицидом магнум. Гербицид анкор-85 вызвал гибель 50...95 % листьев осины, березы, ивы и ольхи серой. Однако полное отмирание листьев зафиксировано только у рябины обыкновенной (табл. 6).

Таблица 6

Действие гербицидов на березу и нежелательную древесно-кустарниковую растительность в смешанном молодняке (опыт 3, обработка 29.06.2020)
The effect of herbicides on birch and undesirable tree-shrub vegetation in mixed young stands (experiment 3, treatment 06/29/2020)

Вариант опыта	Дата учета	Доля отмерших листьев, %				
		береза (виды)	ива (виды)	осина	ольха серая	рябина обыкновенная
Магнум, ВДГ, 100 г/га	06.09.2020	0	100	100	78	100
	21.08.2021	0	100	100	75	100
	15.09.2022	0	100	100	72	100
Магнум, ВДГ, 200 г/га	06.09.2020	0	100	100	95	100
	21.08.2021	0	100	100	72	100
	15.09.2022	0	100	100	77	100
Анкор-85, ВДГ, 100 г/га	06.09.2020	85	90	50	95	100
	21.08.2021	59	65	82	71	100
	15.09.2022	52	68	76	65	100

В следующем вегетационном сезоне в вариантах с гербицидом магнум наблюдалось полное отмирание листьев у ивы, осины и рябины обыкновенной; береза, как и при учете в период вегетации 2020 г., не имела повреждений. В варианте с гербицидом анкор-85 наблюдалось повторное отрастание ветвей от корневых систем у ивы, осины и ольхи серой. Наибольшую чувствительность к данному гербициду проявила рябина обыкновенная.

В вегетационном сезоне 2022 г. в вариантах применения в концентрации 100 и 200 г/га эффективность действия гербицида магнум осталась на прежнем уровне (табл. 6). Из нежелательных древесных пород частично сохранилась только ольха серая.

В конце сезона 2022 г. в опытах 2 и 3 в вариантах с наиболее перспективным гербицидом магнум и в контрольных вариантах были проведены учеты густоты (количества) и высоты всех имеющихся древесных пород (табл. 7).

Таблица 7

Изменение состава древостоя и средней высоты древесных пород после обработки селективными гербицидами в полевых опытах 2 и 3 (учет 15.09.2022)
Change in stand composition and average height of tree species after treatment with selective herbicides in field experiments 2 and 3 (accounting 09/15/2022)

Вариант опыта	Состав древостоя	Средняя высота древесной породы, м				
		береза (виды)	осина	ива (виды)	ольха серая	рябина обыкновенная
<i>Опыт 2</i>						
Магнум, ВДГ, 100 г/га	9,3Б 0,7Ос	2,5	1,4	–	–	–
Магнум, ВДГ, 200 г/га	10Б	2,4	–	–	–	–
Контроль	4,4Ос 2,6Ив 2,2Б 0,8Рб	1,6	2,2	1,7	–	1,6
<i>Опыт 3</i>						
Магнум, ВДГ, 100 г/га	8,6Б 1,4Ол	2,9	–	–	1,5	–
Магнум, ВДГ, 200 г/га	8,8Б 1,2Ол	2,7	–	–	1,6	–
Контроль	4,6Ив 2,3Ос 1,5Б 1,1Ол 0,5Рб	1,6	2,8	2,4	2,9	1,5

*a**б*

Рис. 2. Опыт 3 (обработка 29.06.2020, фото 15.09.2022): *a* – магнум, 100 г/га; *б* – контроль (без обработки)

Fig. 2. Experiment 3 (chemical treatment 29.06.2020, photo 15.09.2022): *a* – magnum 100 g/ha; *б* – control (without treatment)

Береза в отсутствие конкуренции резко увеличила прирост в высоту по сравнению с контролем. Средняя высота березы после химического ухода превышала этот показатель в контроле на 50...81 %. В результате сформировались древостои с ее преобладанием – от 8,6 до 10 ед. состава (рис. 2). В контрольных вариантах ее доля в составе по количеству деревьев была всего 2,2 и 1,5 ед. Важно, что высота сохранивших жизнеспособность после химического ухода отдельных деревьев осины (опыт 2) и ольхи серой (опыт 3) значительно ниже этого показателя у березы.

Выводы

1. Установлено эффективное и длительное действие гербицидов магнум и магнум супер в нормах от 100 до 300 г/га на широкий спектр многолетних двудольных (широколистных) нежелательных травянистых видов, типичных для вырубок и молодняков таежной зоны, при опрыскивании в период вегетации. Магнум и магнум супер продемонстрировали также высокую эффективность действия на ряд нежелательных листовенных древесно-кустарниковых пород – иву, осину и рябину обыкновенную (до 100 %). Против ольхи серой эти гербициды были несколько менее эффективны.

2. Береза проявила высокую устойчивость к гербицидам магнум и магнум супер. В вариантах с высокими нормами их применения (200–300 г/га) наблюдалось лишь незначительное и кратковременное повреждение листьев данного вида. При более низкой норме (100 г/га) фиксируемые визуально повреждения отсутствовали. В результате устранения конкуренции резко улучшался рост березы, формировались молодняки с ее доминированием при незначительном участии других листовенных пород, прежде всего – ольхи серой.

3. Установлено эффективное и достаточно длительное действие гербицида анкор-85 в нормах 100...300 г/га на широкий спектр многолетних однодольных и двудольных (широколистных) нежелательных травянистых видов, типичных для вырубок и молодняков таежной зоны. По арборицидной активности анкор-85 значительно уступал препаратам магнум и магнум супер, вызывал повреждения поросли и отпрысков древесных пород, приводя к ослаблению роста и отмиранию только части деревьев. Были повреждены такие древесные породы, как осина, ива, ольха серая, рябина обыкновенная, а также береза, что свидетельствует о нецелесообразности использования препарата анкор-85 при уходах за березой из-за его недостаточной селективности.

4. Гербицид мортира уступал препаратам магнум и магнум супер по действию как на нежелательные двудольные травянистые виды, так и на древесно-кустарниковую растительность. Он повреждал поросль и отпрыски древесных пород – осины, ивы, ольхи серой и рябины обыкновенной, что не приводило к их гибели. Береза проявила высокую устойчивость к этому гербициду в нормах 100 и 200 г/га при сплошном опрыскивании в период ее активного роста, но из-за низкой эффективности действия гербицида на нежелательные листовенные древесно-кустарниковые породы его применение при уходах за березой нецелесообразно.

Таким образом, результаты изучения возможности использования гербицидов при уходе (агротехнические ухода, осветления) за семенным возобновлением березы внесут значительный вклад в опыт отечественного воспроизводства хозяйственно-ценных березовых древостоев с применением химического метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бубнов А.А., Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Постников А.М. Экологическая оценка гербицидов, используемых при лесовыращивании // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 4. С. 58–75.

Bubnov A.A., Egorov A.B., Pavlyuchenkova L.N., Postnikov A.M. Ecological Assessment of Herbicides Used in Forestry Cultivation. *Proceedings of SPBFRI*. Saint-Petersburg, 2022, no. 4, pp. 58–75 (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.4.58>

2. Егоров А.Б. Воспроизводство хозяйственно ценных лесов с применением химического метода: история, современное состояние и перспективы развития // Тр. СПбНИИЛХ. СПб.: СПбНИИЛХ, 2000. Вып. 2(3). С. 18–33.

Egorov A.B. Reproduction of Economically Valuable Forests Using Chemical Method: History, Current State, and Development Prospects. *Proceedings of SPBFRI*. Saint-Petersburg, 2000, iss. 2(3), pp. 18–33. (In Russ.).

3. Егоров А.Б., Бельков В.П. Химический метод регулирования лесных фитоценозов // Таежные леса на пороге XXI века: тр. СПбНИИЛХ (Посвящается 70-летию СПбНИИЛХ). СПб., 1999. С. 157–163.

Egorov A.B., Belkov V.P. Chemical Method of Forest Phytocenoses Regulation. Taiga Forests on the Threshold of the XXI Century. *Proceedings of SPBFRI. (Dedicated to the 70th anniversary of SPBFRI)*. Saint-Petersburg, 1999, pp. 157–163. (In Russ.).

4. Егоров А.Б., Бубнов А.А., Рябинков А.П. Применение гербицидов при выращивании хвойных пород и березы в лесных питомниках: практ. рекомендации. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 49 с.

Egorov A.B., Bubnov A.A., Ryabinkov A.P. *The Use of Herbicides in the Cultivation of Conifers and Birches in Forest Nurseries: Practical Recommendations*. Saint-Petersburg, SPBFRI Publ., 2005. 49 p. (In Russ.).

5. Егоров А.Б., Жигунов А.В. Лесовосстановление с применением химического метода. СПб.: СПбГЛТА, СПбНИИЛХ, 2009. 68 с.

Egorov A.B., Zhigunov A.V. *Reforestation Using Chemical Method: Training Manual*. Saint-Petersburg, SPBSFTU, SPBFRI Publ., 2009. 68 p. (In Russ.).

6. Егоров А.Б., Омеляненко А.Я., Постников М.В., Бубнов А.А. Применение гербицидов при уходе за лесом: практ. рекомендации. СПб.: СПбНИИЛХ, 2005. 28 с.

Egorov A.B., Omelyanenko A.Y., Postnikov M.V., Bubnov A.A. *The Use of Herbicides in Forest Care: Practical Recommendations*. Saint-Petersburg, SPBFRI, 2005. 28 p. (In Russ.).

7. Егоров А.Б., Павлюченков Н.А., Павлюченкова Л.Н. Формирование молодняков ели и березы на сплошных вырубках после предварительной химической подсушки осины // Лесоведение. 2012. № 2. С. 61–65.

Egorov A.B., Pavlyuchenkov N.A., Pavlyuchenkova L.N. Formation of Young Spruce and Birch Stands in Clear-cut Areas After Preliminary Chemical Drying of Aspen. *Lesovedenie = Forestry*. 2012, no. 2, pp. 61–65. (In Russ.).

8. Испытания гербицидов на землях несельскохозяйственного назначения // Методические указания по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве / Всерос. НИИ защиты растений, Минсельхоз России. СПб., 2013. С. 186–189.

Guidelines for Registration Testing of Herbicides in Agriculture (Section - Testing of Herbicides on Non-agricultural Lands). All-Russian Institute of Plant Protection, Ministry of Agriculture of Russia. Saint-Petersburg, 2013, pp. 186–189. (In Russ.).

9. Каспаров В.А., Промоненков В.К. Применение пестицидов за рубежом. М.: Агропромиздат, 1990. 224 с.

Kasparov V.A., Promonenkov V.K. *Pesticide Use Abroad*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990, 224 p. (In Russ.).

10. Леонтьев В.Н., Ахрамович Т.И., Игнатовец О.С., Лазовская О.И. Естественные пути деградации гербицидов ряда сульфонилмочевины // Тр. БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2013. № 4. С. 197–204.

Leontiev V.N., Akhramovich T.I., Ignatovets O.S., Lazovskaya O.I. Natural Ways of Degradation of Herbicides of the Sulfonylurea Series. *Proceedings of BSTU. Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology*, 2013, no. 4. pp. 197–204. (In Russ.).

11. Макеева-Гурьянова Л.Т., Спиридонов Ю.Я., Шестаков В.Г. Сульфонилмочевины – новые перспективные гербициды: обзорная информация М.: ВНИИТЭИагропром, 1989. 57 с.

Makeeva-Guryanova L.T., Spiridonov J.Y., Shestakov V.G. *Sulfonylureas - New Promising Herbicides: Overview Information*. Moscow, VNIITE And Agroprom Publ., 1989. 57 p. (In Russ.).

12. Макеева-Гурьянова Л.Т., Спиридонов Ю.Я., Шестаков В.Г. Применение некоторых сульфонилмочевин в сельском хозяйстве и их поведение в объектах окружающей среды // *Агрохимия*. 1989. № 1. С. 127–136.

Makeeva-Guryanova L.T., Spiridonov J.Y., Shestakov V.G. The Use of Some Sulfonylureas in Agriculture and Their Behavior in Environmental Objects. *Agrokimiya = Agrochemistry*, 1989, no. 1, pp. 127–136. (In Russ.).

13. Омеляненко А.Я., Павлюченков Н.А. Особенности последующего естественного возобновления ели после предварительной химической подсушки осины перед сплошной рубкой древостоя // *Тр. СПбНИИЛХ*. СПб.: СПбНИИЛХ, 2006. Вып. 3(16). С. 61–67.

Omelyanenko A.Y., Pavlyuchenkov N.A. Peculiarities of Subsequent Natural Regeneration of Spruce After Preliminary Chemical Drying of Aspen Before Clear-cutting of Forest Stands. *Proceedings of SPBFRI*. Saint-Petersburg, SPBFRI Publ., 2006, iss. 3(16), pp. 61–67. (In Russ.).

14. Постников М.В. Уход за семенным возобновлением березы на Северо-Западе России с использованием современных гербицидов избирательного действия: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2000. 21 с.

Postnikov M.V. *Care of Birch Seed Regeneration in Northwest Russia Using Modern Herbicides of Selective Action*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint-Petersburg, 2000, 21 p. (In Russ.).

15. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2022 г.: приложение к журналу «Защита и карантин растений», № 4. М.: Колос, 2022. 880 с.

List of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use on the Territory of the Russian Federation. Appendix to the journal «Plant Protection and Quarantine», 2022, no. 4. Moscow, Kolos Publ., 2022. 880 p. (In Russ.).

16. Anderson R.L. Environmental Effects of Metsulfuron and Chlorsulfuron Bioactivity in Soil. *Journal of Environmental Quality*, 1985, vol. 14, iss. 4, pp. 517–521. <https://doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400040011x>

17. Grey T.L., McCullough P.E. Sulfonylurea Herbicides' Fate in Soil: Dissipation, Mobility, and Other Processes. *Weed Technology*, 2012, vol. 26, iss. 3, pp. 579–581. <https://doi.org/10.1614/WT-D-11-00168.1>

18. Nix S. Herbicides Used to Control Woody Stem Plants. *ThoughtCo*, 2019. Available at: <https://www.thoughtco.com/herbicides-to-control-woody-stem-plants-1342625> (accessed 11.08.21).

19. Nosnikov V.V., Mayseenok A.P. Herbicides Application at Cultivation of the Planting Stock of Deciduous Species in Forest Nurseries. *Proceedings of BSTU*. Forestry, 2014, no. 1, pp. 99–103.

20. Sarmah A.K., Kookana R.S., Alston A.M. Fate and Behavior of Triasulfuron, Metsulfuron-methyl, and Chlorsulfuron in the Australian Soil Environment: a Review. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1998, vol. 49, iss. 5, pp. 775–790. <https://doi.org/10.1071/A97131>

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*232.12+620.952

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-75-89

Биоэнергетические и репродукционные насаждения настоящих тополей в Центральном Черноземье России

*А.П. Царев*¹ ✉, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: S-6639-2019*,

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

*Р.П. Царева*¹, *канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID: AAK-2110-2021*,

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

В.А. Царев^{1,2}, *канд. с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: ABE-5600-2020*,

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

*П.М. Евлаков*², *канд. биол. наук*; *ResearcherID: AAP-4811-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

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 им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; vad.tsareff@yandex.ru, peter.evlakov@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.10.22 / Одобрена после рецензирования 12.01.23 / Принята к печати 14.01.23

Аннотация. Необходимость использования быстрорастущих древесных видов для получения биоэнергии отмечалась в международной и отечественной печати еще во 2-й половине XX в. В 1-е двадцатилетие текущего столетия эта проблема в ряде стран не только приобрела научно-исследовательский характер, но и нашла практическое решение. Рассмотрены результаты исследования настоящих тополей (черных, бальзамических и их гибридов) на вновь заложенных полевых экспериментах в Центрально-Черноземном регионе РФ. Цель исследования – изучение и отбор перспективных форм настоящих тополей. Были созданы экспериментальные участки 2 типов: сортоиспытательные участки и коллекционно-маточные плантации – для репродукции перспективных клонов и сортов. На сортоиспытательных участках наблюдали за укореняемостью, сохранностью и ростом в высоту, на репродукционных коллекционно-маточных плантациях определяли выход посадочного материала (стеблевых черенков). Лучшие результаты по росту отмечены на 2-летних сортоиспытательных объектах ООО «Объединенные питомники» и карбоновом полигоне Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова в Воронежской области. Здесь выделено несколько быстрорастущих в ювенильном возрасте клонов и сортов настоящих тополей. Среди них можно отметить тополь волосистоплодный-84, евро-американский культивар Сакрау-59, гибриды Э.с.-38 и Версия. Их средние высоты варьировали от 359±21,5 до 416±12,7 см, а максимальные – от 435 до 495 см. Наиболее хорошие результаты при выращивании репродукционного материала получены на коллекционно-маточной плантации Куликовского лесхоза Липецкого управления лесного хозяйства. Среди 1-летних растений лучшие результаты по росту оказались у тополей китайского (133 см), Мариландики (147 см), дельтовидного (149 см), Э.с.-38 (157 см) и волосистоплодного-84 (183 см). Среди 1-летних побегов, выросших на 3-летних корнях,

превосходили остальные по высоте Сакрау-59 (340 см), Э.с.-38 и дельтовидный (по 240 см), Мариляндика (230 см) и Версия (200 см). В целом выход стандартных стеблевых черенков из 1-летних растений на 1-летних корнях составлял около 16 000 шт./га, а из 1-летних растений на 3-летних корнях – 78 460 шт./га. Отмеченные выше клоны и сорта могут быть рекомендованы для создания биоэнергетических плантаций в Центрально-Черноземном регионе РФ. Полученные первые результаты данных исследований перспективны в плане рационального использования возобновляемых энергетических ресурсов в России.

Ключевые слова: тополь, тополь настоящий, сорта настоящих тополей, гибриды настоящих тополей, клоны настоящих тополей, сортоиспытательные полевые насаждения, коллекционно-маточные плантации, выход стеблевых черенков, биоэнергия, Центральное Черноземье

Благодарности: Авторы благодарят коллег из Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии за помощь в создании опытных объектов. Особую благодарность авторы выражают работникам производственных предприятий Липецкой и Воронежской областей: Куликовского лесхоза (директор – А.А. Сергеев), ООО «Объединенные питомники» (генеральный директор – А.Н. Цепляев), а также филиала ООО «Соколиные Сады» (директор – К.П. Колесник). Эти и другие производственные предприятия оказывали содействие при выращивании гибридов, закладке сортоиспытательных и коллекционно-маточных плантаций тополей, уходе за ними и их охране.

Для цитирования: Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Евлаков П.М. Биоэнергетические и репродукционные насаждения настоящих тополей в Центральном Черноземье России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 75–89. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-75-89>

Original article

Bioenergetic and Reproductive Plantations of True Poplar Species in the Central Black Earth Region of Russia

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>

Petr M. Evlakov², Candidate of Biology, ResearcherID: [AAP-4811-2020](https://orcid.org/0000-0003-0138-2410),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

¹Russian Research Institute of Forest Genetics, Selection 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. Timiryaseva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; vad.tsareff@yandex.ru, peter.evlakov@yandex.ru

Received on October 9, 2022 / Approved after reviewing on January 12, 2023 / Accepted on January 14, 2023



This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Abstract. The need to use fast-growing tree for bioenergy production was noted in the international and domestic press in the second half of the 20th century. In the first twenty years of the current century in a number of countries this problem has not only acquired research character, but also found a practical solution. The results of the research of true poplars (black, balsamic and their hybrids) on newly established field experiments in the Central Black Earth Region of the Russian Federation are considered. The aim of the research is to study and select promising forms of true poplars. Two types of experimental plots were established: variety testing plots and collection-stool bed plantations for reproduction of promising clones and varieties. The rooting ability, safety and growth in height were monitored on variety testing plots, and the yield of planting material (stem cuttings) was determined on reproductive collection-stool bed plantations. The best results on growth were noted on 2-year variety testing site facilities of LLC "United Nurseries" and carbon polygon of Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov in Voronezh region. Several fast-growing clones and varieties of true poplars at juvenile age were identified here. Among them we can mention *P. trichocarpa* No. 84, euramerican cultivar Sacrau-59, hybrids E.s.-38, and Version. Their average heights ranged from 359±21.5 to 416±12.7 cm, and maximum heights ranged from 435 to 495 cm. The best results in growing reproductive material were obtained at the collection-stool bed plantation of the Kulikovskiy Forestry of the Lipetsk Forestry Department. Among annual plants the best growth results were found in the poplars *trichocarpa* No. 84 (183 cm), *deltoides* (149 cm), Marylandica (147 cm), *simonii* (133 cm) and E.s.-38 (157 cm). Among the annual shoots grown on three-year-old roots, Sacrau-59 (340 cm), E.s.-38 and *deltoides* (240 cm each), Marylandica' (230 cm) and Version (200 cm) were superior to the others in height. In general, the yield of standard stem cuttings from annual plants on 1-year-old roots was about 16 thousand pieces/ha and from annual plants on 3-year-old roots – 78 460 pieces/ ha. The clones and varieties mentioned above can be recommended for creation of bioenergy plantations in the Central Black Earth region of the Russian Federation. The first obtained results of these studies are promising in terms of rational use of renewable energy resources in Russia.

Keywords: poplar, true poplar, true poplar varieties, true poplar hybrids, true poplar clones, variety testing sites, collection-stool bed plantations, stem cuttings yield, bioenergy, Central Black Earth Region

Acknowledgements: The authors would like to thank their colleagues from the Russian Research Institute of Forest Genetics, Selection and Biotechnology for their assistance in the establishment of experimental facilities. The authors would like to express their special gratitude to the workers of production enterprises of Lipetsk and Voronezh regions: Kulikovskiy Forestry (Director – A.A. Sergeev), LLC "United Nurseries" (General Director – A.N. Tseplyaev), as well as a branch of LLC "Sokolinye Sady" (Director – K.P. Kolesnik). These and other production enterprises provided assistance in growing hybrids, planting variety testing and collection-mat plantations of poplars, their care and protection.

For citation: Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Evlakov P.M. Bioenergetic and Reproductive Plantations of True Poplars Species in the Central Black Earth Region of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 75–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-75-89>

Введение

О необходимости использовать быстрорастущие лиственные древесные виды для получения биоэнергии сказано в международной [8, 10, 21] и отечественной [6] печати еще во 2-й половине XX в. При этом для создания более эффективных биоэнергетических плантаций предлагалось применение отсе-

лектированных представителей различных древесных видов. В последующие годы селекции быстрорастущих древесных растений, особенно тополей, получению биоэнергии уделялось все больше внимания как за рубежом [19, 20], так и в России [2, 7, 9].

На последней, 26-й Всемирной сессии Международной комиссии Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН по тополи и другим быстрорастущим древесным растениям в 2022 г. о проблеме получения биоэнергии на плантациях высказывались представители Аргентины (L.I. Faastino et al. [11]), Германии (T. Simon, L. Dirk [15]), Латвии и Литвы (E. Linkevicius, D. Lazdina [13]), Польши (M. Niemczyk, A. Kaliszewski [14]), Украины (Н. Кутсоконь и др. [12]), Чехии (J. Weger et al. [18]) и других стран. В докладах российских исследователей на этой сессии (опубликованы в дискуссионной группе 2 «Селекция, отбор и оценка» рабочего раздела 2 «Доместикация и консервация генетических ресурсов») отмечалась важность селекции зимостойких быстрорастущих тополей и осин [16, 17].

Для использования древесных растений в биоэнергетике, особенно в условиях России, они должны обладать некоторыми особенностями: быстротой роста, в частности в ювенильном возрасте, устойчивостью к зимним морозам, способностью к значительному накоплению биомассы и др. При этом одним из важных показателей является стабильность рангов роста растений в молодом возрасте. Так, Г.П. Озолин [3] полагал, что при отборе быстрорастущих гибридов тополей более целесообразным является отбор среди 2-летних гибридных растений, однако необходимо ждать многие годы (10–15 лет) для окончательного заключения о производительности того или иного полученного нового гибрида. Н.В. Старова [5] указывала, что предварительные выводы по сортовому районированию тополей и скорости их роста можно дать через 3 года после начала сортоиспытания. П.Л. Богданов [1] оценивал срок выведения и передачи сортов тополей в практику в 20 лет. В.М. Ровский и Е.Г. Саркисова [4] на основании результатов исследования 5-летних сеянцев сделали вывод, что оценку скорости роста тополей следует начинать не ранее 3–4-летнего возраста.

В работе А.П. Царева [6] при исследовании смены рангов роста от 2–5 лет до возраста технической спелости (15–25 лет) было установлено, что для обеспечения гарантии надежности выбора быстрорастущих растений необходимо ориентироваться на группу лидеров. Для определения численности этой группы прослежена динамика лидирующих клонов тополей, которые были отобраны в 2-летнем возрасте. Выяснилось, что в этом возрасте следует отбирать не менее 3–4 лидирующих клонов, чтобы быть уверенным, что хотя один из них останется в лидирующей группе к возрасту технической спелости. В 3–5-летнем возрасте такую гарантию можно получить уже при 2 лидирующих клонах, но для более высокой точности необходимо отбирать 3–4 лидирующих сорта, гибрида или клона.

При этом данная ориентация зависит также от цели создания насаждений: выращивание крупной древесины; озеленение, защитное лесоразведение, облесение овражно-балочных систем; потребности энергетики, особенно при посадке короткоротационных плантаций, когда требуется в кратчайшие сроки получить максимум биомассы. То есть возраст количественной спелости для

биоэнергетических целей может быть значительно снижен, что позволяет проводить селекцию растений в ювенильном возрасте. В зависимости от целей это может быть 2–3- и 5-летний возраст.

Цель исследования – изучение приживаемости, сохранности и динамики роста различных сортов, гибридов и клонов тополей в начале ювенильного возраста и отбор их перспективных форм. Кроме того, анализировался выход стандартных черенков на опытно-производственных коллекционно-маточных плантациях (КМП) в различном возрасте корневых систем тополей.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на нескольких новых сортоиспытательных участках и КМП, созданных с 2015 по 2022 г. в Воронежской и Липецкой областях. Здесь в последние 3 года отобран ряд сортов и перспективных клонов тополей, из которых сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии (ВНИИЛГИСБиотех) и Воронежского государственного лесотехнического университета (ВГЛТУ) заложено 5 опытно-производственных объектов энергетической направленности:

1. Сортоиспытательный участок в «Объединенных питомниках». Объект находится в с. Приволье Семилукского района Воронежской области. Участок заложен весной 2021 г. Географические координаты – 51°48'14" с. ш. 38°57'13" в. д.; высота над уровнем моря – 175 м. Почва – обыкновенный суглинистый чернозем. Площадь участка – 0,16 га. Расстояние между растениями – 2 м в рядах и 4 м в междурядьях. Число повторностей – 5. Настоящие тополя (черные, бальзамические и их гибриды) высажены стандартными стеблевыми черенками: длина – 20–25 см, минимальная толщина в верхнем отрезе – 0,6–2,0 см (ГОСТ 17267–71 «Черенки тополя для лесостепной и степной зон»). Белые тополя высажены укорененными саженцами, требования к которым определены ГОСТ 17266–71 «Саженьцы тополей черенковые для лесостепной и степной зон». Из настоящих тополей на этом участке были высажены следующие культивары: Регенерата (*Populus × euramericana* (Dode) Guinier cv. Regenerate); Сакрау-59 (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. sacrau-59); волосистоплодный-84 (*P. trichocarpa* Torr. et Gray), – а также гибриды Э.с.-38, полученный М.М. Вересиним, Борей и Версия, полученные А.П. Царевым.

2. КМП, примыкающая к описанному выше сортоучастку в с. Приволье. Заложена весной 2022 г. На ней представлено 16 клонов, гибридов и сортов настоящих тополей:

2 из секции черных пирамидальных: Пирамидально-осоконовый Камышинский селекции А.В. Альбенского (ПОК) и сорт Бриз селекции Р.П. Царевой и В.А. Царева;

5 евро-американских культиваров из секции черных тополей с раскидистой формой кроны: Бахельери (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. Bachelieri), Брабантика-175 (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. Brabantica), Сакрау-59 (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. sacrau-59), Серотина-19 (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. serotina-19), Серотина-189 (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. serotina-189);

2 вида черных тополей: дельтовидный (*P. deltoides* Marsh.) и Победа (*P. nigra* L.) из Волгограда;

3 вида из секции бальзамических тополей: волосистоплодный-84 (*P. trichocarpa* Torr. et Gray), китайский-85 (*P. simonii* Carr.) и московский-101 (*P. moskowiensis* Schroed.);

4 межсекционных гибрида настоящих тополей: Борей, Версия, Ивантеевский и Э.с.-38.

Все настоящие тополя посажены стеблевыми черенками. Площадь КМП – 0,37 га, расстояние между растениями в рядах – 1 м, между рядами – 4 м. Оба участка закладывались сотрудниками ВНИИЛГИСбиотех совместно с работниками Объединенных питомников.

3. КМП Куликовского лесхоза Липецкого управления лесного хозяйства. Местоположение – с. Боровое Усманского района Липецкой области. Географические координаты – 52°12'43" с. ш. 39°30'32" в. д., высота над уровнем моря – 109 м. Почва – чернозем обыкновенный суглинистый. Посадка осуществлена стандартными стеблевыми черенками с размещением посадочных мест 3,0×0,5 м. Плантация состоит из 2 участков. Оба участка закладывались сотрудниками ВНИИЛГИСбиотех совместно с работниками Куликовского лесхоза. Первый участок заложен на площади 0,24 га, а второй – на площади 0,15 га. Полученные результаты приведены по более молодому 2-му участку. На нем высажены следующие клоны и сорта настоящих тополей: ПОК из секции черных пирамидальных, дельтовидный, Мариландика (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. marilandica) и Сакрау-59 (*P. × euramericana* (Dode) Guinier cv. sacrau-59) из секции черных тополей с раскидистой кроной; волосистоплодный-84 (*P. trichocarpa* Torr. et Gray), китайский-85 (*P. simonii* Carr.) и Максимовича (*P. maximowiczii* Henry) из секции бальзамических тополей; Борей, Версия, Ивантеевский и Э.с.-38 из группы межсекционных гибридов настоящих тополей.

4. Сортоиспытательный участок филиала «Соколиных Садов», расположенный в Нижнедевицком районе Воронежской области. Географические координаты – 51°41'36" с. ш. 38°36'02" в. д.; высота над уровнем моря – 225 м. Почва – чернозем обыкновенный суглинистый. Площадь участка – 1,0 га. Размещение растений с расстоянием между ними 4 м в рядах и 4 м в междурядьях. Число повторений – 4. Все тополя высажены стандартными стеблевыми черенками.

5. Карбоновый полигон создан на территории лесного питомника ВГЛТУ. Географические координаты – 51°04'21" с. ш. 39°01'17" в. д; высота над уровнем моря – 150 м. Почва – темно-серая лесостепная среднесуглинистая на лессовидном карбонатном суглинке. Площадь, занятая настоящими тополями, составляет 0,11 га. Размещение 3×2 м. Посадка осуществлена стеблевыми черенками. Проводилось по 3 прополки в течение вегетации. В 1-й год выполнялись поливы в жаркие периоды (3 раза в месяц), во 2-й год участок в поливах не нуждался. На участке испытывалось 5 клонов настоящих тополей: ПОК, Сакрау-59, Э.с.-38, местный тополь черный (осокорь) и белый тополь Ведуга.

Расчет выхода черенков на 1 га определялся по формулам:

$$N = \frac{6667Sn}{100}; \quad N = \frac{2500Sn}{100},$$

где 6667 и 2500 – количество кустов на 1 га при размещении 3,0×0,5 и 4×1 м соответственно; *S* – сохранность кустов, %; *n* – выход черенков с 1 куста.

В настоящей работе по всем полевым опытно-производственным объектам анализировались результаты исследований только по настоящим тополям (черным, бальзамическим и их гибридам).

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели роста и сохранности 2-летних тополей на сортоиспытательном участке в с. Приволье представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рост и сохранность 2-летних тополей на сортоучастке в с. Приволье (посадка – 12.04.21, замеры – 31.08.22)
Poplars' survival and growth in Privolye village variety testing site at the age of 2 years (planting – 12.04.21, measurements – 31.08.22)

Сорт/клон	Инвентарный номер	Высажено, шт.	Сохранность, %	Высота, см			
				\bar{x}	$\pm S_{\bar{x}}$	max	min
<i>Секция черных тополей</i>							
Регенерата	78	31	77	260	16,5	395	115
Сакрау-59	50	19	84	370	13,8	470	270
<i>Секция бальзамических тополей</i>							
Волосисто-плодный	84	14	93	416	12,7	470	320
<i>Межсекционные гибриды настоящих тополей</i>							
Э.с.-38	94	35	97	374	8,8	440	245
Борей	13-01	21	71	264	22,1	390	130
Версия	22-08	14	93	359	21,5	435	170

Примечание: \bar{x} – среднее; $\pm S_{\bar{x}}$ – стандартная ошибка.

Из данных табл. 1 видно, что сохранность испытанных тополей в 2-летнем возрасте колебалась от 71 (Борей) до 97 (Э.с.-38) %. Наибольшая средняя высота в 2-летнем возрасте оказалась у тополя волосистоплодного – $416 \pm 12,7$ см. Хорошие значения высот в этом возрасте были и у гибридов Э.с.-38 ($374 \pm 8,8$ см) и Сакрау-59 ($370 \pm 13,8$ см). При этом максимальные высоты отмеченных тополей достигали 440–470 см.

На рис. 1 представлен общий вид насаждений тополя Э.с.-38 и тополя Сакрау-59 в 2-летнем возрасте, произрастающих на двух сортоучастках в с. Приволье. Средняя высота на 31.08.2022 г. у тополя Э.с.-38 была 374 см, у тополя Сакрау-59 – 370 см.

Показатели сохранности и роста 1-летних тополей, произрастающих на КМП в с. Приволье, приведены в табл. 2. Данные показывают, что в целом укореняемость всех тополей, кроме 2 черных пирамидальных и 1 межсекционного гибрида Ивантеевского, была высокой и колебалась от 83 до 100 %. Наибольшая средняя высота отмечена у 2 бальзамических тополей: волосистоплодного-84 ($179 \pm 6,5$ см) и китайского-85 ($138 \pm 2,8$ см). Средняя высота по всей КМП составила 119 см.



Рис. 1. Насаждение тополей на сортоиспытательном участке в с. Приволье. На переднем плане: *a* – тополь Э.с.-38 (возраст – 2 года, средняя высота – 374 см); *б* – тополь Сакрау-59 (возраст – 2 года, средняя высота – 370 см)

Fig. 1. Poplar trees growing on the variety testing site at the Privolye village. In the foreground: *a* – poplar E.s.-38 (age – 2 years, average height – 374 cm); *б* – poplar Sacrau-59 (age – 2 years, average height – 370 cm)

Таблица 2

**Приживаемость и рост 1-летних тополей на КМП в с. Приволье
(посадка – 13.04.22, замеры 31.08.22)**
**Survival and growth of annual poplars at the collection-stool bed plantation
in Privolye village (planting – 13.04.22, measurements – 31.08.22)**

Сорт/клон	Инвентарный номер	Высажено, шт.	Приживаемость, %	Высота, см			
				\bar{x}	$\pm S_{\bar{x}}$	max	min
<i>Секция черных пирамидальных тополей</i>							
ПОК	91	50	70	92	3,0	125	50
Бриз	04-06	63	32	123	5,5	160	57
<i>Секция черных тополей с раскидистой формой кроны</i>							
Бахельери	30	110	86	128	3,4	192	20
Брабантика-175	58	17	94	103	6,7	142	47
Дельтовидный	–	31	90	113	4,9	169	62
Победа	–	5	100	96	7,1	118	82
Сакрау-59	50	80	94	138	3,8	200	40
Серотина	19	31	90	111	8,3	220	11
Серотина-686	189	10	100	103	8,2	149	75
<i>Секция бальзамических тополей</i>							
Волосисто-плодный	84	35	97	179	6,5	230	32
Китайский	85	60	83	138	2,8	169	93
Московский	101	40	88	109	3,8	153	50
<i>Межсекционные гибриды настоящих тополей</i>							
Э.с.-38	94	61	93	121	4,4	178	24
Ивантеевский	46	36	69	114	4,3	156	74
Борей	13-01	25	100	109	5,2	157	5
Версия	22-08	45	98	121	4,4	170	25

Выход стандартных черенков у рассматриваемых 1-летних настоящих тополей варьировал по секциям: от 2,4 (Бриз) до 3,5 (ПОК) тыс. шт./га у черных пирамидальных; от 4,7 (Брабантика-175) до 9,4 (Сакрау-59) тыс. шт./га у черных с раскидистой кроной; от 4,4 (московский) до 12,1 (волосистоплодный) тыс. шт./га у бальзамических; от 3,5 (Ивантеевский) до 7,3 (Версия) тыс. шт./га у межсекционных гибридов. В целом по участку средний выход стеблевых черенков на 1-летней плантации в Приволье в пересчете на 1 га составил 5890 шт.

Приживаемость и рост 1-летних растений настоящих тополей на 1-летних и 3-летних корнях на Куликовской опытно-производственной КМП представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Приживаемость и рост 1-летних тополей
на Куликовской опытно-производственной КМП
Survival and growth of annual poplars plants at the Kulikovsky experimental
production collection-stool bed plantation**

Сорт/клон	Инвентарный номер	Высажено, шт.	Приживаемость, %	Высота на 1-летних корнях, см		Показатели на 3-летних корнях	
				\bar{X}	$\pm S_{\bar{x}}$	средняя высота, см	выход черенков, шт./га
<i>Секция черных пирамидальных тополей</i>							
ПОК	91	87	90	111	5	180	66 700
<i>Секция черных тополей с раскидистой формой кроны</i>							
Дельтовидный	–	29	79	149	9	240	122 878
Мариландика	34	13	77	147	19	230	144 539
Сакрау-59	50	33	79	107	6	340	64 997
<i>Секция бальзамических тополей</i>							
Волосисто-плодный	84	56	84	183	12	190	111 806
Китайский	85	17	88	133	10	175	64 069
<i>Межсекционные гибриды настоящих тополей</i>							
Борей	13-01	60	63	120	8	100	7264
Версия	22-08	47	85	115	6	200	146 251
Ивантеевский	46	70	69	126	5	180	32 495
Э.с.-38	94	158	84	157	5	240	170 452

Из данных табл. 3 видно, что у испытанных клонов и сортов тополей приживаемость оказалась довольно высокой, она колебалась от 77 до 90 %, составляя в среднем 88,5 %. Средняя высота 1-летних побегов на 1-летних корнях у разных клонов варьировала от 107 (Сакрау-59) до 183 (волосистоплодный) см. В среднем по участку она составила 130 см.

Выход стандартных черенков у рассматриваемых 1-летних настоящих тополей на 1-летних корнях колебался по секциям: 17,9 тыс. шт./га (ПОК) у черных

пирамидальных; от 15,8 (Сакрау-59) до 21,1 (дельтовидный) тыс. шт./га у черных с раскидистой кроной; от 4,9 (Максимовича) до 33,6 (волосистоплодный) тыс. шт./га у бальзамических; от 13,7 (Ивантеевский) до 27,8 (Э.с.-38) тыс. шт./га у межсекционных гибридов. Средний выход стеблевых черенков на участке у тополей на 1-летних корнях на Куликовской плантации в пересчете на 1 га оказался равен 16,0 тыс. шт./га.

На рис. 2 показан общий вид 2-летней маточной плантации, заложенной в Куликовском лесхозе Липецкой области.



Рис. 2. 2-летняя маточная плантация тополей в Куликовском лесхозе Липецкой области. На переднем плане слева – тополь Э.с.-38 (высота – 2,6 м), справа – тополь китайский (высота – 2,4 м)

Fig. 2. Two-year-old stool bed plantations of poplars in the Kulikovsky forestry of the Lipetsk region. In the foreground on the left – poplar E.s.-38 (height 2.6 m), on the right – *P. simonii* (height 2.4 m)

Средняя высота 1-летних побегов (хлыстов) тополей на 3-летних корнях варьировала от 100 (Борей) до 340 (Сакрау-59) см и в среднем по участку составила 190 см, что на 46 % больше высоты побегов, растущих на 1-летних корнях.

Выход стандартных черенков у рассматриваемых 1-летних побегов настоящих тополей на 3-летних корнях колебался по секциям: 66,7 тыс. шт./га (ПОК) у черных пирамидальных; от 65,0 (Сакрау-59) см до 144,5 (Мариландика) тыс. шт./га у черных с раскидистой кроной; от 64,0 (китайский) до 111,8 (волосистоплодный) тыс. шт./га у бальзамических; от 7,2 (Борей) до 170,5 (Э.с.-38) тыс. шт./га у межсекционных гибридов. Средний выход черенков на 3-летних корнях составил 78 460 шт./га, что в 5 раз превышает их выход на 1-летних корнях.

Результаты, полученные в 1-й год на опытно-производственном сортоиспытательном участке на землях филиала «Соколиных Садов», представлены в табл. 4. Приживаемость испытываемых тополей в 1-летнем возрасте колебалась от 39 (Мариландика) до 97 (Э.с.-38) %. Наибольшая средняя высота отмечена у тополя волосистоплодного из секции бальзамических ($99 \pm 4,5$ см). На 2-м месте по высоте на этом участке был гибрид Э.с.-38 ($82 \pm 3,3$ см).

Следует отметить, что на этом участке уходы проводились нерегулярно и поэтому показатели сохранности и роста по высоте несколько ниже, чем могли бы быть в случае регулярных уходов. Однако данный факт не мешает проследить характерные для насаждения тенденции.

Таблица 4

Приживаемость и рост 1-летних тополей на сортоиспытательном участке на землях филиала «Соколиных Садов»
Survival and growth of annual poplars at the variety testing site on the lands of Sokolinye Sady LLC branch

Сорт/клон	Инвентарный номер	Высажено, шт.	Приживаемость		Высота, см	
			шт.	%	\bar{X}	$\pm S_{\bar{X}}$
ПОК	91	64	37	58	47	3,2
Мариландика	34	64	25	39	45	6,0
Сакрау-59	50	64	42	66	64	4,7
Волосистоплодный	84	64	53	83	99	4,5
Версия	22-08	64	53	83	61	3,9
Ивантеевский	46	64	48	75	55	4,1
Э.с.-38	94	64	62	97	82	3,3
Черный (опушка)	–	100	24	24	54	7,7
<i>Итого</i>		612	344	56	65	1,8

В табл. 5 представлены сведения о росте 2-летних тополей, произрастающих на карбоновом полигоне ВГЛТУ.

Таблица 5

Рост и сохранность 2-летних тополей на карбоновом полигоне ВГЛТУ
Growth and survival of poplars at the age of two years on the carbonic polygon of VGLTU

Сорт/клон	Инвентарный номер	Высажено, шт.	Сохранность, %	Высота, см			
				\bar{X}	$\pm S_{\bar{X}}$	max	min
ПОК	91	50	82	209	9	332	107
Сакрау-59	50	25	68	355	19	484	215
Э.с.-38	94	25	80	399	16	495	210
Осокорь	–	75	87	172	13	336	45
<i>Итого и среднее</i>		175	82	219	11	495	45

Согласно данным табл. 5, сохранность тополей на карбоновом полигоне ВГЛТУ в 2-летнем возрасте была значительной – 82 %. Средняя высота по участку составила 219 ± 11 см. Лучшими по росту стали евро-американский культивар Сакрау-59 (355 ± 19 см) и отечественный гибрид Э.с.-38 (399 ± 16 см).

Мир ускоряет движение к эпохе рационального использования природных ресурсов, особенно энергетических. Если раньше основной упор делался на использование ископаемых и невозобновляемых ресурсов, то во многих странах сегодня переходят к парадигме производства возобновляемых энерго-ресурсов. Среди них быстрорастущие древесные породы занимают значительное место. В Советском Союзе занимались селекцией разных древесных растений, но после его распада эта работа была сильно ослаблена [7].

Однако в последнее время появились энтузиасты, которые заинтересовались выращиванием быстрорастущих древесных пород. Первые результаты таких работ в Центральном Черноземье изложены в этой статье. Во многих случаях хорошие результаты, не уступающие зарубежным, получены во многом благодаря заботливому уходу за опытными полевыми экспериментами. Так, при изучении 4 культиваров тополей в Германии на черноземе в Эрфурте в Тюрингии (Т. Simon, L. Dirk, 2022 г. [15]) выяснилось, что их высоты в 3-летнем возрасте колебались от 277 (у тополя Fritzi Pauley) до 448 (у тополя Мах-1) см. На сортоиспытательном участке в Объединенных питомниках в с. Приволье Семилукского района Воронежской области (см. табл. 1) при изучении 6 сортов и клонов тополей высоты у 2-летних растений варьировали от $260 \pm 16,5$ (у евро-американского сорта Регенерата) до $416 \pm 12,7$ (клон тополя волосистоплодного № 84) см. На карбоновом полигоне ВГЛТУ высота 2-летних настоящих тополей колебалась от 172 ± 13 до 399 ± 16 см, что также не уступало результатам, полученным в Тюрингии. При этом лучшим клоном на данном участке оказался также тополь Э.с.-38, который был передан ВГЛТУ сотрудниками ВНИИЛГИСбиотех после размножения и испытания его в разных зонах европейской части РФ и Украины.

Сравнивая полученные данные на опытно-производственных КМП в Воронежской и Липецкой областях, можно отметить, что лучшие результаты за 3 года отмечены на территории Куликовского лесхоза (директор – А.А. Сергеев) Липецкого управления лесного хозяйства. В 1-й год роста клон Э.с.-38 показал среднюю высоту $157 \pm 5,0$ см. Это выше, чем в с. Приволье ($121 \pm 4,4$ см), на 30 %. А наиболее быстрорастущий в 1-е годы тополь волосистоплодный-84 имел практически одинаковые результаты – при несущественном превышении – с липецким тополем (см. табл. 2 и 3).

Наиболее низкие значения роста тополей в 1-й год в «Соколиных Садах» можно объяснить только чрезвычайной загруженностью сотрудников и недостатком рабочей силы в текущем первоначальном году деятельности в этом направлении. Учитывая энтузиазм руководства по реальному созданию энергетических плантаций в стране, можно рассчитывать на прогресс в последующие годы и в Центральном Черноземье.

Выводы

В настоящей публикации проанализированы пионерные работы последнего десятилетия по созданию биоэнергетических полевых опытных объектов в Центральном Черноземье. Они позволяют сделать следующие выводы:

1. Приживаемость и сохранность на сортоиспытательных объектах «Объединенных питомников» и в «Соколиных Садах» варьировала у разных клонов: от 71 до 97 % (в среднем 86 %) в 1-м случае и от 24 до 97 % (в среднем 56 %) – во 2-м. Наиболее высокие показатели в «Объединенных питомниках» были у тополей Э.с.-38 (97 %), волосистоплодного (93 %), Версии (93 %) и Сакрау-59 (84 %); в «Соколиных Садах» – у Э.с.-38 (97 %), Версии (83 %) и волосистоплодного (83 %).

2. Лучшие результаты по росту зафиксированы на 2-летних сортоиспытательных объектах Объединенных питомников. Здесь выделено несколько быстрорастущих в ювенильном возрасте клонов и сортов настоящих тополей.

Среди них можно отметить тополя волосистоплодный-84, Э.с.-38, Сакрау-59 и Версия. Их средние высоты варьировали от $359\pm 21,5$ до $416\pm 12,7$ см, а максимальные – от 435 до 470 см.

3. Хорошие показатели получены и на Карбоновом полигоне Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова со средней сохранностью 2-летних тополей 82 %. На этом участке (в отличие от остальных, описанных в данной работе) регулярно проводились уходы и в засушливые периоды – поливы. Здесь средние высоты лучших клонов тополей колебались от 209 ± 9 до 399 ± 16 см, а их максимальные высоты – от 332 до 495 см.

4. Наиболее хорошие результаты при выращивании репродукционного материала получены на коллекционно-маточной плантации Куликовского лесхоза Липецкого управления лесного хозяйства. Среди 1-летних растений лучшие показатели зафиксированы у тополей волосистоплодного-84 (183 см), Э.с.-38 (157 см), дельтовидного (149 см), Мариландика (147 см) и китайского (133 см). Среди 1-летних растений, выросших на 3-летних корнях, самыми перспективными оказались тополя Сакрау-59 (340 см), Э.с.-38 и дельтовидный (по 240 см), Мариландика (230 см) и Версия (200 см). В целом выход стандартных стеблевых черенков из 1-летних растений на 1-летних корнях составил 16,0 тыс./га, а на 3-летних корнях – 78,5 тыс. шт./га.

5. Таким образом, в различных условиях произрастания лучшие приживаемость, сохранность, рост в высоту и выход стандартного посадочного материала в ювенильном возрасте показали тополя волосистоплодный, Э.с.-38, Сакрау-59, Версия и некоторые другие – они могут быть рекомендованы для создания биоэнергетических плантаций в Центрально-Черноземном регионе РФ.

6. Полученные первые результаты новых исследований перспективны в плане рационального использования возобновляемых энергетических ресурсов в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богданов П.Л. Тополя и их культура. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 104 с.
Bogdanov P.L. *Poplars and Their Culture*. Moscow, Forest industry Publ., 1965. 104 p. (In Russ.).
2. Морковина С.С., Колесниченко Е.А., Царев А.П., Воробьев А.Ю., Торжков И.О. Факторы развития лесопромышленного бизнеса в современных условиях хозяйствования. СПб.: СПбНИИ лесн. хоз-ва, 2017. 158 с.
Morkovina S.S., Kolesnichenko E.A., Tsarev A.P., Vorobyev A.J., Torzhkov I.O. *Factors of Development of Timber Business in Modern Economic Conditions*. St. Petersburg, St. Petersburg Research Institute of Forestry Publ., 2017. 158 p. (In Russ.).
3. Озолин Г.П. Селекция тополя в Узбекистане на быстроту роста, производительность и устойчивость к болезням и вредителям. Ташкент: М-во сел. хоз-ва УзССР. Среднеаз. науч.-исслед. ин-т лесн. хоз-ва, 1962. 198 с.
Ozolin G.P. *Poplar Selection in Uzbekistan for Growth Rate, Productivity and Resistance to Diseases and Pests*. Tashkent, Ministry of Agriculture of the Uzbek SSR. Central Asian Scientific Research Institute of Forestry, 1962. 198 p. (In Russ.).
4. Ровский В.М., Саркисова Е.Г. О минимальном возрасте, в котором следует начинать отбор быстрорастущих растений тополя // Тр. СредАзНИИЛХ. 1969. Вып. 11. С. 158–163.
Rovsky V.M., Sarkisova E.G. On the Minimum Age at Which to Start Selecting Fast-growing Poplar Plants. *Proceedings of SredAzNIILKH*, 1969, iss. 11, pp. 158–163. (In Russ.).
5. Старова Н.В. Методика селекции и сортоиспытания тополей. Харьков: УкрНИИЛХА, 1962. 60 с.

Starova N.V. *Methodology of Poplars Breeding and Variety Testing*. Kharkiv, URIFFM Publ., 1962. 60 p. (In Russ.).

6. Царев А.П. Минимальный возраст для оценки быстроты роста тополей при сортоиспытании // Лесоведение. 1977. № 3. С. 67–71.

Tsarev A.P. Minimum Age for Assessing the Growth Rate of Poplars During Variety Testing. *Lesovedeniye = Forestry*, 1977, no. 3, pp. 67–71. (In Russ.).

7. Царев А.П., Лаур Н.В., Царев В.А., Царева Р.П. Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 38–55.

Tsarev A.P., Laur N.V., Tsarev V.A., Tsareva R.P. The Current State of Forest Breeding in the Russian Federation: Trend of Recent Decades. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 6, pp. 38–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-38-55>

8. Царев А.П., Мироненко С.С. Возможности энергетических плантаций тополя в центральной лесостепи // Лесн. хоз-во. 1997. № 2. С. 35–36.

Tsarev A.P., Mironenko S.S. The Possibilities of Poplar Energy Plantations in the Central Forest-steppe. *Lesnoe khozaistvo = Forestry*, 1997, no. 2, pp. 35–36. (In Russ.).

9. Царев А.П., Царев В.А. Биомасса тополей подрода *Eupopulus* Dode для производства биоэнергии // Лесн. вестн. 2015. № 6. С. 57–62.

Tsarev A.P., Tsarev V.A. Biomass of Poplar Trees of Subgenus *Eupopulus* Dode for Bioenergy Production. *Lesnoy Vestnik = Forestry Bulletin*, 2015, no. 6, pp. 57–62. (In Russ.).

10. Bajaj Y.P.S. Biotechnology of Tree Improvement for Rapid Propagation and Biomass Energy Production. *Trees*. Berlin, 1986, no. 1, pp. 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70576-2_1

11. Faustino L.I., Alvarez J.A., Garcia C.M., Bonnin S.M. *Potential Yield of Populus Deltoides Nacurutú Inta Plantations at Delta of Rio Parana, Argentina*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 103. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

12. Kutsokon N., Khudolieva L., Rakhmetov J., Rakhmetova S., Rashydov N. *Evaluation of the Fast-growing Tree Clones for Bioenergy Needs in Ukraine*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 95. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

13. Linkevicius E., Lazdina D. *Allasia Poplar Clone Productivity and Growth in Latvia and Lithuania – Short Rotation Coppice First Harvest Results*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 102. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

14. Niemczyk M., Kaliszewski A. *The Effects of Cultivar and Rotation Length of Biomass Production, Sustainability, and Economic Profitability of Poplar (Populus ssp.) Bioenergy Plantation*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022.

P. 96. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

15. Simon T., Dirk L. *Growth of Four Poplar Varieties in a Short Rotation Coppice System on a Chernozem in Erfurt, Thuringia (Germany)*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 100. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

16. Tsarev A., Tsareva R. *Breeding of Frost Resistant Poplar Varieties in Central Chernozem Region of Russia*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 7. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

17. Tsareva R., Tsarev V. *Aspen Breeding in the Central Black Earth Region of Russia*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 6. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

18. Weger J., Humešova T., Vavrova K. *Fast-growing Trees in Agroforestry Systems for Erosion Control and Biomass Production – Concept and First Results*. Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: The role of Salicaceae and other fast-growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation (Rome, Italy 05-08 October 2021). Rome (Italy), 2022. P. 106. Available at: <http://www.fao.org/ipc/en/>; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/> (accessed 18.10.23).

19. Wühlisch G. von. *Ergebnisse der Züchtung von Pappeln und Aspen in Großhansdorf. Perspektiven für die Energie – und Rohstoffherzeugung*. Vortr. Pflanzenzüchtung, 2006, vol. 70, pp. 157–172. (In Germ.).

20. Ylitalo E., Mustonen M. Consumption of Renewable Energy and Wood Fuels in the European Union. *Forest Bioenergy for Europe*, 2014, no 4, pp. 17–22.

21. Zsuffa L., Giordano E., Pryor L.D., Stettler R.F. *Trends in Poplar Culture: Some Global and Regional Perspectives*. Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation. Ed. by R.F. Stettler, Jr.H.D. Bradshaw, P.E. Heilman, T.M. Yinckley. Ottawa, NRC-CNRC, NRC Research Press Publ., 1996. pp. 515–539.

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

Original article
УДК 630*231
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-90-102

Natural Regeneration on Deadwood in the Primeval Forest Janj

Zoran Govedar¹✉, Corresponding member of ASARS, Doctor of Forestry, Prof.;

ResearcherID: [AAH-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

Nadezhda Prokhorova², Senior Lecturer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-7074>

Violeta Babić³, Doctor of Forestry, Prof.; ResearcherID: [ABA-2260-2021](https://orcid.org/0000-0001-6848-8442),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-8442>

Vojislav Dukić¹, Doctor of Forestry, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1111-0593>

Branko Kanjevac³, Doctor of Forestry, Assistant; ResearcherID: [ABA-2079-2021](https://orcid.org/0000-0002-5940-3600),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5940-3600>

Srdan Bilić¹, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8120-9559>

¹University of Banja Luka, blv. Stepa Stepanović, 75, Banja Luka, 78000, Republic of Srpska; zoran.govedar@sf.unibl.org✉, vojislav.dukic@sf.unibl.org, srdjan.bilic@sf.unibl.org

²Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; nadnov40@yandex.ru

³University of Belgrade, Kneza Višeslava, 1, Belgrade, 11000, Serbia; violeta.babic@sfb.bg.ac.rs, branko.kanjevac@sfb.bg.ac.rs

Received on January 24, 2022 / Approved after reviewing on April 21, 2022 / Accepted on April 26, 2022

Abstract. The paper investigates the natural regeneration of downed deadwood in the Janj primeval forest. The old-growth forest is located in the southwestern part of the Republic of Srpska, which is dominated by dolomite geological base on which cambial soils were formed. The climate is perhumid and mountainous and the plantation belongs to the *Piceo-Abieti-Fagetum* community. The hectare contains 517 live trees with a total basal area of 53.0 m²/ha and a volume of 876 m³/ha. Twenty six downed deadwoods classified into three different degrees of decay were included in the study, where fir and spruce seedlings were found to be predominant and beech seedlings were rarely represented. The first degree of decay includes 7 (26.9 %), the second 8 (30.7 %), and the third 11 (42.3 %). The total volume of deadwood is 110.82 m³/ha with an average volume per tree of 4.2 m³/ha. The total number of seedlings on fallen dead trees is 836 seedlings (*Abies alba* – 89.59 %, *Picea abies* – 10.17 %, *Fagus sylvatica* – 0.24 %). Fir seedlings are found on 25 fallen trees, spruce on 18 fallen trees, and beech on 2 fallen trees. Regarding quality, on average fir seedlings are better than spruce seedlings, but both species show a lot of senescence and very small size of current height increment. Most seedlings belong to the third quality class (fir – 46.2 %, spruce – 61.1 %), followed by second class (fir – 34.6 %, spruce – 22.2 %) and third class (fir – 19.2 %, spruce – 16.7 %). The total number of seedlings was found to have a statistically significant difference in the amount of downed deadwood depending on the degree of decay, and the number of seedlings depended on the degree of tree decay. The number of seedlings increased with increasing volume and length of rotten trees.

Keywords: downed deadwood, understory, seedlings, natural generation, primeval forests, old-growth forests, forest Janj, Republic of Srpska

Acknowledgements: This article is the result of the project “Adaptive management of Natural Resource of the Republic of Srpska”. We would like to thank the Ministry of Scientific and



Technological Development, Higher Education and Information Society of the Republic of Srpska for their support in the realization of the project.

For citation: Govedar Z., Prokhorova N., Babić V., Dukić V., Kanjevac B., Bilić S. Natural Regeneration on Deadwood in the Primeval Forest Janj. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 90–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-90-102>

Научная статья

Естественное возобновление на валежной древесине в реликтовом лесу Янь Республики Сербской

З. Говедар¹, чл.-кор. АНИПС, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAH-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

Н. Прохорова², ст. преп.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-7074>

В. Бабич³, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [ABA-2260-2021](https://orcid.org/0000-0001-6848-8442),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6848-8442>

В. Дукич¹, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1111-0593>

Б. Каневац³, д-р с.-х. наук, ассистент; ResearcherID: [ABA-2079-2021](https://orcid.org/0000-0002-5940-3600),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5940-3600>

С. Билич¹, ассистент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8120-9559>

¹Университет Баня-Луки, бульв. Воеводы Степе Степановича, д. 75 а, г. Баня-Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина, 78000; zoran.govedar@sf.unibl.org, vojislav.dukic@sf.unibl.org, srdjan.bilic@sf.unibl.org

²Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; nadnov40@yandex.ru

³Белградский университет, ул. Князя Вишеслава, д. 1, г. Белград, Сербия, 11000; violeta.babic@sfb.bg.ac.rs, branko.kanjevac@sfb.bg.ac.rs

Поступила в редакцию 24.01.22 / Одобрена после рецензирования 21.04.22 / Принята к печати 26.04.22

Аннотация. Исследовано естественное возобновление на стволах упавших деревьев в реликтовом лесу Янь в Республике Сербской (Босния и Герцеговина). Старовозрастные леса расположены в юго-западной части Республики, где преобладает доломитовая геологическая база, на которой сформировались камбиальные почвы. Климат – влажный горный, насаждение принадлежит сообществу *Piceo Abieti Fagetum*. Плотность произрастания деревьев – 517 живых дер./га, общая базальная площадь – 53 м²/га, объем – 876 м³/га. В исследование были включены 26 деревьев валежа, классифицированных по 3 различным степеням гниения. Установлено преобладание подроста пихты и ели, подрост бука представлен единично. К 1-й степени распада относится 7 (26,9 %), ко 2-й – 8 (30,7 %) и к 3-й – 11 (42,3 %) деревьев. Общий объем валежника составляет 110,82 м³/га при среднем объеме одного дерева 4,2 м³/га. Общее количество подроста на упавших деревьях – 836 шт. (*Abies alba* – 89,59 %, *Picea abies* – 10,17 %, *Fagus sylvatica* – 0,24 %). Подрост пихты отмечен на 25 упавших деревьях, ели – на 18, бука – на 2. По качеству подрост пихты в среднем лучше, чем подрост ели, но у обоих видов наблюдается большое устаревание и очень маленький текущий прирост в высоту. Большая часть подроста характеризуется как 3-й класс качества (пихта – 46,2 %, ель – 61,1 %), за ним по чис-

ленности следуют 2-й (пихта – 34,6 %, ель – 22,2 %) и 3-й (пихта – 19,2 %, ель – 16,7 %) классы. Обнаружено, что количество подроста имеет статистически значимые отличия от объема валежа в зависимости от степени гниения. Количество подроста увеличивается с повышением объема и длины гнилых деревьев.

Ключевые слова: валежник, подрост, саженцы, естественное возобновление, девственные леса, старовозрастные леса, лес Янь, Республика Сербская

Благодарности: Эта статья является результатом проекта «Адаптивное управление природными ресурсами Республики Сербской». Авторы также благодарят Министерство научно-технического развития, высшего образования и информационного общества Республики Сербской за поддержку в реализации проекта.

Для цитирования: Говедар З., Прохорова Н., Бабич В., Дукич В., Каневац Б., Билич С. Естественное возобновление на валежной древесине в реликтовом лесу Янь Республики Сербской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 90–102. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-90-102>

Introduction

The total area of forests and forest land of the Republic of Srpska is 1,282,412 ha or 51.7 % of the total area of the Republic. Within this area, protected forest areas of about 48,000 ha are of particular importance, in particular the primeval forest of Jan (295.0 ha), Lom (297.0 ha) and Perucica (1.291.0 ha). These primeval forests are classified as category Ia by the IUCN (International Union for Conservation of Nature). Primeval forests are ecologically protected forests with strong and dynamically balanced relations between climate, soil and organisms, and at the same time preserved from such anthropogenic influences that could change the laws of life processes and the structure of stands [14].

This is a forest that has remained completely stable and natural in terms of its plant structure, composition and climate [10]. The primeval forest in its centuries-long development, which in primeval beech, fir and spruce in the Dinarides lasts approximately 400–500 years, experiences initial, optimal and terminal development phases [15, 23].

The terminal phase is characterized by large amounts of dead, fallen wood, which is an important factor in the matter cycle and is a habitat for many plant and animal species and fungi. The terminal phase is characterized by the decomposition of living biomass, and includes an aging subphase and a decomposition subphase. The aging subphase occurs first and in it the growth of trees decreases, the stability of the stand is disturbed, and the vitality of the trees weakens, the shedding of conifers appears and the process of wood decomposition begins. In the decay subphase decomposition of the stand accelerates, and depending on the degree of decomposition, the trees fall under the blows of the wind, loads of snow or ice. The microhabitats associated with dead trees in primeval forests have a major impact on biodiversity and ecosystem services [18].

Dead wood that falls to the ground is exposed to various types of rot fungi such as beech *Armillaria mellea*, *Fomes fomentarius*, *Ganoderma applanatum*, *Pleurotus ostreatus*, *Polyporus squamosus*, *Schizophyllum commune*, *Trametes gibbosa* i dr., na jeli *Armillaria ostoyae*, *Fomitopsis pinicola*, *Heterobasidion abietinum*, *Phellinus hartigii*, *Sparassis nemechii*, *Trichaptum abietinum* i na smrči *Armillaria ostoyae* *Fomitopsis pinicola*, *Gleophyllum sepiarium*, *Heterobasidium parviporum*, *Serpula lacrymans* and others [32].

Under such conditions of different degree of decay of dead wood, specific microhabitats are formed in which the process of natural regeneration begins. The

dynamics of this process, growth and development of seedlings depend on the degree of decay, light regime, canopy cover, number of seeds, species of trees that are being renewed, etc.

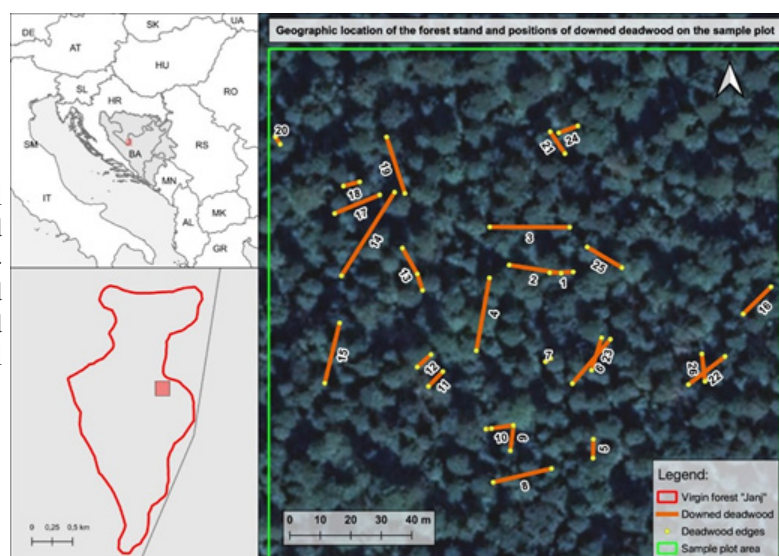
However, there is not much research on the natural regeneration of dead lying wood in primeval forests, especially in the Dinarides. The study of old-growth regeneration can provide many answers to the questions of the forest development dynamics [19] and biogeochemical cycles in forests [17]. Until the beginning of the 21st century, not enough attention was paid to the amount of dead wood in the forest and the importance of these specific microhabitats.

Only about a decade ago, research on dead wood has intensified, mainly on biodiversity [21, 25]. Research on natural regeneration and dynamics of seedling development are very modest. The aim of this paper is to study the structure and natural regeneration of primeval forests in the terminal phase on rotten, fallen trees in different degrees of decay. Data on the degree of decay and seedlings allows us to define the null hypothesis: H_0 – there are no statistically significant differences in the number and height of seedlings developing on fallen dead trees of different degrees of decay.

Research objects and methods

The Janj primeval forest was singled out in 1954 as a research site, with a total area of 295 ha (57.92 ha of core and 237.80 ha buffer zone). In September 2021 it was declared a natural World Heritage Site by UNESCO. This natural asset on the territory of the municipality of Šipovo is protected under the highest category Ia, according to the classification of the IUCN. The Janj old-growth forest reserve is located on the Stolovaš mountain, between 44°07' and 44°10' north latitude and between 17°15' and 17°17' east longitude. The primeval forests are located at an altitude between 1.180 and 1.510 meters above sea level (Fig. 1). A dolomitic geological basement with a series of black, brown and illimerized soils prevails throughout the entire area of the reserve. The studied stand is extremely diverse and contains trees over 300 years old [7].

Fig. 1. Geographical position of the stand in the Janj old-growth forest and downed deadwood in the experimental area



The vegetation of this reserve is the result of habitat conditions and its historical development in the past. The vegetation of the reserve is divided into three groups: *Vaccinio – Piceion Br.* (spruce forest), *Fagion illiricum Ht.* (beech forest of the Illyrian area), *Pinion sylvestris* (white pine forest). The vegetation association of beech and fir with spruce in the "Janj" reserve occupies about 95 % of the area. Its important peculiarity is the high participation of fir and spruce, and almost complete absence of sycamore (*Acer pseudoplatanus*) in the tree layer, which is most likely due to the weaker mesophilicity of habitat conditions.

Subalpine beech forest, its lower underbelt, occupies a small area in the "Janj" reserve, only about 4 % of the total area. It is distributed on the northern and northeastern exposure, 1.470 m above sea level. It differs from the community of beech and fir with spruce, which is followed vertically not only by vegetation, but also by smaller overgrowth, volume, curvature of trees in the appendage, etc. The community of white pine and spruce represents the phase of vegetation succession to its final stage in this area. It occupies a very small area of only 1 %. The area of the reserve, which, according to the Ecological and Vegetation Regionalization of Bosnia and Herzegovina (BiH), is located in the territory of western Bosnia in inland Dinarides, is characterized by the conflict of continental and maritime air masses, which is a common characteristic of the climate of BiH [28].

According to the data from the meteorological station in Šipovo, which is located at 458 m above sea level, for the period 2003–2020, the average annual air temperature is 10.3 °C and the average annual precipitation is 981 mm. It can be estimated that the annual precipitation in the protected area is around 1.200 mm, with a maximum in June and a minimum in August. Judging by the estimated low precipitation amounts in September and October, the data indicate the continental type of precipitation regime.

For the preparation of this paper, data obtained in the core of an old-growth forest at an experimental site of 100×100 m were used. Tree diameters and height were measured above the taxation limit of 5.0 cm. 26 felled trees in different phases of decay were found on the experimental surface on which seedlings emerged. Each fallen tree was numbered, and its GPS coordinates were recorded with the corresponding spatial, attributive, and numerical data: tree species, diameters in the middle, thicker and thinner end (D , cm), length of the fallen tree (L , m), azimuth (°), degree of decomposition (D_d). The degree of tree decay was estimated by the average penetration depth of a 50 cm long metal bar into the upper, middle and lower part of the lying dead wood [4]:

low degree up to 10 cm, less time than tree fall (1–10 years);

medium degree from 10 to 30 cm, medium time than tree fall (10–30 years);

high degree greater than 30 cm, long period of time since tree fall (over 30 years).

The degree of tree rot depends on the length of time the fallen tree has been on the ground. Data collection on seedlings included determining the species, measuring the height of the seedlings (h , cm) and estimating the age of the seedlings based on the vertebrae of conifers (years). Seedling quality (1 – excellent; 2 – good; 3 – poor) was assessed in coniferous species based on obsolescence (ratio of length of apical and lateral shoots) and vitality. Data processing on the basic taxonomic elements of the stand as well as on dead, fallen trees were processed using dendrometric - statistical methods. The volume of downed deadwood trees was determined with the use of Huber's equation:

$$V = Lg_{1/2},$$

where V – volume, m^3 ; L – length, m ; $g_{1/2}$ – basal area in the middle of the tree, m^2 .

Data processing on seedlings and analysis of the dependence of the number of seedlings on the degree of decay of fallen trees was carried out using the analysis of variance, and testing the significance of differences in the number of seedlings was carried out using the F test. Statistical data processing was performed in the IBM SPSS Statistics 23.

Results and discussion

There are 517 trees with a total basal area of 53.0 m^2/ha and a volume of 876 m^3/ha in the stand on the hectare in standing condition. Based on previous research [7], it was estimated that the current volume increment is about a 8.0 m^3/ha (Fig. 2).

A small percentage of volume increment is a characteristic feature of old-growth forests [22]. Although all the three main tree species have very favorable conditions for growth and development, fir outperforms spruce and beech (Fig. 2).

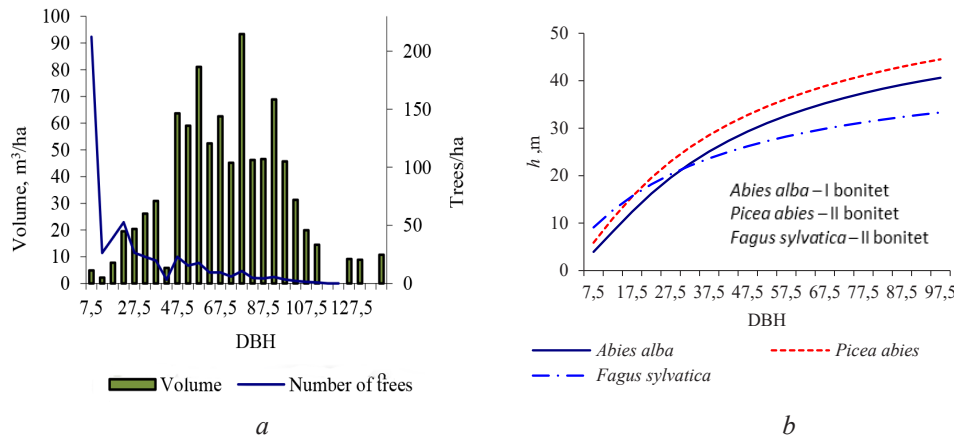


Fig. 2. Volume, number of trees (a) and hight curve and bonity (b)

Twenty six downed deadwood ("dead wood") in different degrees of decay were found in the experimental surface. The first degree of decay included 7 (26.9 %), the second 8 (30.7 %), and the third 11 (42.3 %) trees. The lowest value of dead lying wood volume was 0.41 m^3 , and the highest was 17.77 m^3 (Table 1).

Table 1

Descriptive statistics for diameter, length and volume of downed deadwood

Values	N	Mean	Med.	Min	Max	Variance	St. dev	CV	Se	α_3	α_4
D (cm)	26	46.1	40.0	21.0	83.6	317.2	17.8	38.6	3.4	0.6	-0.5
L (m)		16.6	15.0	3.6	32.1	69.3	8.3	49.9	1.6	0.3	-0.9
V (m^3/ha)		4.2	3.0	0.4	17.7	17.6	4.2	98.6	0.8	1.7	3.2

The total volume of lying dead wood is 110.82 m^3/ha with an average volume of one tree 4.2 m^3/ha . The large variability of volume as an indicator is due to the large difference in the dimensions of fallen dead trees on the experimental surface. Thus, trees of larger size and volume fell to the ground due to physiological weakening and

the action of wind and snow. Thinner trees, lower heights and volumes are mainly due to the fall of mature trees on them. Trees of the first degree of decay have a total volume of 41.40 m³/ha (37.3 %), the second degree of decay 41.88 m³/ha (37.8 %), and the third 27.54 m³/ha (24.9 %). Depending on the degree of decay of the trees, there are differences in diameter and volume of fallen trees. Based on the obtained results using one ANOVA, it can be concluded that there is a statistically significant difference in volume values at different degrees of decomposition. This difference is particularly noticeable in the volume of trees belonging to the first and second degree of decay compared to trees belonging to the third degree of decay (Table 2).

Table 2

ANOVA for the volume of trees of different degrees of decay of "dead wood"

D_d	V (m ³)	N	V_s (m ³)	V_{\min} (m ³)	V_{\max} (m ³)	F	p -value	F_{crit}
1	41.40	7	5.91	0.51	17.77		–	
2	41.88	8	5.24	0.83	12.27			
3	27.54	11	2.50	0.41	6.45			
Total	110.82	26	4.26	–	–	6.20	0.02	4.03

The longitudinal cross-sectional area of fallen trees $(D + d) / 2L$ is 206.30 m² and occupies an area of 2.0 % of the total experimental area and represents a potential "active" area for restoration on downed deadwood.

Characteristics of the seedlings. Beech, fir and spruce seedlings were found on 25 downed deadwood trees and only one tree had no seedlings observed (Table 3). The number of seedlings varies significantly depending on the degree of decay of the trees.

Table 3

Descriptive statistics for number, height and age of seedlings on downed deadwood

Parametres	Downed deadwood	N	Mean	Med.	Min	Max	Variance	St. dev.	CV	Se	α_3	α_4
Number of seedlings	Fs	2	1.0	1.0	1.0	1.0	–	–	–	–	–	–
	Aa	25	29.9	22.0	2.0	146.0	876.2	29.6	98.8	5.9	2.9	10.0
	Pa	18	4.7	4.0	1.0	21.0	19.8	4.4	94.3	1.0	3.1	11.4
High (cm)	Fs	2	14.0	14.0	10.0	18.0	32.0	5.6	40.4	4.0		
	Aa	25	5.8	4.1	2.1	11.9	9.7	3.1	52.8	0.6	0.7	–0.7
	Pa	18	13.2	3.2	1.0	85.0	448.4	21.1	160.2	4.9	2.6	7.7
Age (years)	Fs	2	3.0	2.5	2.0	3.0	0.5	0.7	28.2	0.5		
	Aa	25	3.0	2.4	1.0	7.0	1.7	1.3	48.3	0.2	2.2	5.5
	Pa	18	5.0	2.5	1.0	17.0	32.1	5.6	107.1	1.3	1.2	0.0

Note: Fs – *Fagus silvatica*; Aa – *Abies alba*; Pa – *Picea abies*; N – number of downed deadwood with seedlings.

Beech seedlings are least represented on fallen deadwood (26 trees) (2 individuals), followed by spruce (85 individuals), and fir seedlings are the most numerous (749 individuals). The total number of seedlings on fallen trees is 836 seedlings (*Abies alba* – 89.59 %, *Picea abies* – 10.17 %, *Fagus silvatica* – 0.24 %). Fir seedlings are found on 25 fallen trees, spruce on 18 fallen trees and beech on 2 fallen trees. No seedlings are found on one fallen tree. The Levene test was used to confirm the condition of homogeneity of dispersion of the total number of seedlings of tree groups with different degrees of decay and to ensure the possibility of applying the

analysis of variance in further processing. The analysis of variance showed that there were no statistically significant differences in the total number of seedlings between the analyzed groups of trees of different decay degrees (Table 4).

Table 4

ANOVA for the total number of seedlings on trees of different degrees of decay of downed deadwood

	Sum of squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between groups	3563.171	2	1781.585	2.332	.121
Within groups	16806.989	22	763.954	–	–
<i>Total</i>	20370.160	24	–	–	–

However, due to the small sample size, differences between the centers of the number of trees for different degrees of decay of fallen trees were tested using post-hoc analysis, i.e., subsequent comparisons of the numbers of offspring between groups of rotten trees were performed (Table 5). It was found that there is a statistically significant difference in the total number of seedlings between fallen trees between 1 and 3 degrees of tree decay, so the null hypothesis was rejected. Also, it was found that there are no statistically significant differences in the number of seedlings between 1 and 2 or 2 and 3 groups of fallen trees.

Table 5

Post-Hoc test of least significant difference (LSD) ANOVA comparison of the means of the total number of offspring between groups of lying trees

(I) Degree of decay	(J) Degree of decay	Mean Differ. (I–J)	Std. Error	Sig.	95 % Confidence Interval	
					Lower bound	Upper bound
1	2	–14.30357	14.30491	.328	–43.9701	15.3630
	3	–28.27500*	13.11067	.042	–55.4649	–1.0851
2	1	14.30357	14.30491	.328	–15.3630	43.9701
	3	–13.97143	13.62100	.316	–42.2197	14.2768
3	1	28.27500*	13.11067	.042	1.0851	55.4649
	2	13.97143	13.62100	.316	–14.2768	42.2197

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

The dependence of the number of seedlings on the degree of decay of fallen trees is expressed by a straight line regression (Fig. 3, Table 6) and shows that the number of seedlings increases with increasing degree of decay, volume and length of downed deadwoods. When quality is considered, on average, fir seedlings are of better quality than spruce seedlings, but both species exhibit high obsolescence and very small size of current height increment. Fir, as a highly sciophilic species, tolerates heavy shade conditions better and has, on average, a taller apical shoot than spruce. The average length of the apex shoot of fir on felled deadwood is 2.2 cm, while that of spruce is 1.8 cm. The majority of seedlings are of third class quality (fir – 46.2 %, spruce – 61.1 %), followed by second (fir – 34.6 %, spruce – 22.2 %) and third (fir – 19.2 %, spruce – 16.7 %). The quality of beech seedlings was not assessed due to the small number of seedlings.

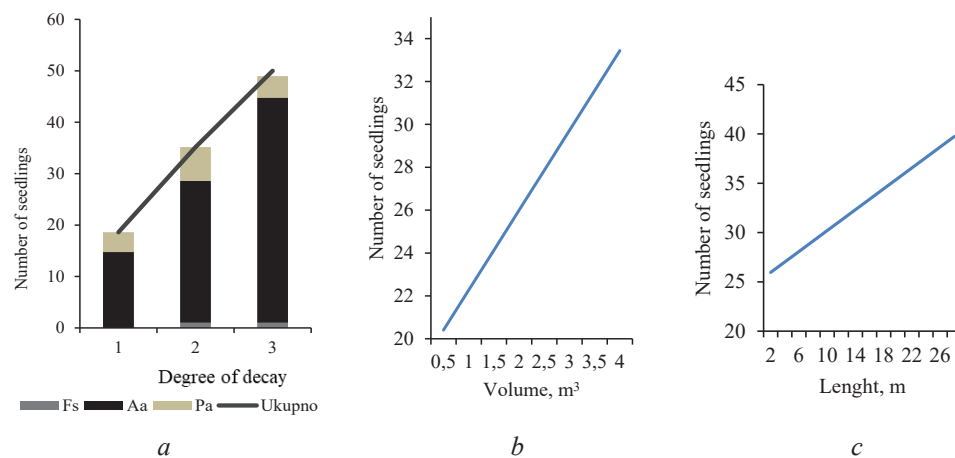


Fig. 3. Dependence of the total number of seedlings on the degree of decay (a), volume (b) and length (c) of downed deadwood

Table 6

Parameters of linear regression (dependent variable – number of trees)

Independent variable	$Y = a + bX$		R^2	F	p
	a	b			
Degree of decay	4.044	14.132	0.175	4.876	0.037
Volume decay of trees	18.545	3.724	0.129	2.658	0.120
Length of decaying trees	24.897	0.530	0.042	1.004	0.327

The amount of dead wood determined in this research is similar to the values determined in other natural reserves, which in Northeast America averages 121 m³/ha in the forest *Tsuga canadensis* [30], then in an old oak and beech forest *Quercus–Fagus grandifolia* 82–132 m³/ha [9]. The quantities of dead wood in northern Europe are much smaller and in white pine and spruce forests they range from 60 to 120 m³/ha of dead wood [26]. The largest quantities were found in forests Douglas-fir-Hemlock – about 1.500 m³/ha [9, 31], in the reserves of pure beech forests, an average of 113 m³/ha is found [5].

The ratio of the volume of dead and living wood is otherwise very variable because it depends on the development phase, the composition of the species and the geographical location. In the studied stand, this ratio is 12.65 %, but similar research shows that it can be higher, especially in mixed forests with a large proportion of fir. In fact, fir is considered to be an endangered species due to climate change, especially due to drought [1], its vitality declines, trees dry up and fall to the ground, thus increasing the proportion of dead wood. The first records of forest degradation in Europe are related to the degradation of spruce. The common fir in Europe has been periodically dying out since about 1500 years [16], but recently, due to extreme occurrences, drought, bark beetle attacks and a chain of other pests and diseases, the resistance of fir has increased [10, 11, 20].

Dead wood is a temporary substrate for epixyl fungi as well as a starting substrate for seed germination and the emergence of seedlings. The substrate gradually decomposes and eventually turns into a lignohumus form, forming small elevations as a specific morphological form of relief. In the process of the growth, seedlings, passing to older developmental stages, become more and more firmly attached to the substrate,

which is formed as a result of wood rotting. A feature of natural regeneration on rotten wood is that lignohumus has been playing a key role in the regeneration, growth and development of seedlings for several decades, unlike seedlings that do not grow on dead wood. Cryptogamous species such as lichens and mosses are also an integral part of dead wood microhabitats, affecting seed retention and creation of germination conditions [27].

A large number of seedlings do not appear on fallen trees until they reach the 2nd and 3rd stages of decay [24], and although they cover a relatively small area, a huge number of seedlings can be found on them [6], as was found in these studies. Despite the relatively low content of water-soluble nutrients in deadwood at late decomposition stages, seedlings develop successfully because they rely on mycorrhizal associations to acquire nitrides [29]. On dead wood, there is less snow retention, less competition from weeds, and the growing season lasts somewhat longer, so seedlings have relatively more favorable conditions for growth [3]. In addition, on very steep terrains, downed logs are important because they prevent erosion and landslides, which allows seedlings to develop successfully.

The number of seedlings depends on the morphological characteristics of tree species, such as: specific weight of seeds, seed germination and on the ecological conditions of the habitat, light, climatic conditions, soil. In addition, the number depends on the frequency and abundance of fruiting forest trees [12].

The microhabitats in which the seedlings appear are very diverse [conifers, trunk, cracks in the tree, moss). Fir and spruce seedlings are more numerous than beech seedlings due to the size of the seed and its characteristics. Beech seeds are much larger and heavier, so under the influence of gravity, they roll from the dead trees to the ground. Spruce seeds are the smallest and are easily retained in microcracks and on the moss of dead trees. The key factors for seed germination are humidity and heat. Humidity is higher in trees with a higher degree of decay, but the amount of heat also depends on the conditions of the stand assembly and light penetration. In the terminal phase of primeval forests development, openings within the stand occur as a result of extinction and decay of trees, and a larger amount of light and heat reaches the soil surface and fallen dead trees [8], thus creating favorable conditions for seed germination, especially on trees in late stages of decay (degree 3).

The edaphic specificity of the primeval forests is in the creation of lignohumus as a kind of parahumus. Namely, dead trees falling to the ground form an irregular intertwined lattice horizontal texture and decay under the influence of fungi in the profile of which more than 50 % of wood is located and Myco-lignochemical humus is formed [13]. Partial and complete humification and mineralization is performed and lignohumus is formed as a specific form of humus in the creation of which wood participates the most [31]. It contains large amounts of humic and fulvic acids that strongly promote seed germination, root development and allow better use of water, improve mobilization and absorption of other nutrients and minerals.

The degree and speed of decay depends, among other things, on the type of trees and the duration of the decay process. Beech trees decay the fastest and create the most favorable conditions for the development of numerous species, as the humus is more basic, then fir, and finally spruce, which is the most acidic. The number of spruce seedlings is higher in less saturated soils and at $\text{pH} < 7$ [7].

Based on the number of seedlings, it can be stated that conditions for the emergence and development of seedlings on dead fallen trees are very favorable.

Namely, the determined number shows that in similar homogeneous conditions as on dead trees, the number of seedlings would be 40.423 seedlings/ha. Earlier research shows that under the conditions of the developmental phase in the transition from terminal to initial, the total number of seedlings in the Lom primeval forests in Republic of Srpska was 4.225 individuals per hectare and in the Janj primeval forest 6.600 individuals per hectare [7].

The experience of studying the importance and role of dead wood in old-growth forests is also important for managed forests, because in addition to natural regeneration, dead wood in forests allows reducing pest gradation and fires [2], which can be achieved by increasing the rotation duration of managed forests.

Conclusion

Natural spontaneous process of regeneration takes place in old-growth forests without human influence. Considering that the share of natural forests in the Republic of Srpska is large (over 90 %), it is clear that the knowledge of forestry science on natural regeneration in primeval forests is of great importance for forest management. Natural regeneration of commercial forests corresponds to the sub-phase of decay, which means that preparatory cuttings are performed in a way that mimics the process of degradation of the forest complex in primeval forests under the influence of various factors of living and non-living nature. However, the main difference is that in primeval forests during the destruction of dead wood it remains in the forest and natural regeneration occurs on it, and in managed forests wood is removed from the forest. Additionally, in old-growth forests there is a natural selection of trees that fall to the ground, and in managed forests the selection and cutting of trees are done by humans in accordance with management goals. Therefore, we understand the old-growth forest as a "school of nature" that provides knowledge about the natural life path of the forest from its origin to extinction, i.e., decay and re-emergence at the same time. In the old-growth forest we can find many different types and forms of regeneration process which is mainly caused by chance or the influence of natural disorders, windbreaks, diseases, pests, snowstorms, etc. and the process of physiological aging. The main conclusions that can be emphasized in this research are as follows:

the ratio of downed deadwood trees to live trees is 12.65 %, which corresponds to the average found in previous research;

the degree of decay in the initial stages has no statistically significant effect on the volume of lying trees, while in the later stages of decay this effect is pronounced;

beech seedlings are poorly represented (0.24 %) on downed deadwood, and fir seedlings dominate in quantity (almost 90 %);

fir seedlings are of slightly better quality and higher average age gain than spruce seedlings.

Research on the amount of dead wood in old-growth forests and commercial forests as well as the processes that take place on them in terms of natural regeneration and biodiversity in the Dinarides should be continued. Extensive research has been conducted in the primeval forests of Republic of Srpska in the past, but not enough attention has been paid to the natural processes that cause downed deadwood. Earlier research certainly indicates the stability of the Dinarides primeval forests and their good condition. By studying the dynamics of regeneration of primeval forests ecosystems in terms of changes caused by the natural elimination of dominant trees, their fall and rot, we gained insight into specific natural processes caused by

microhabitats. This is still an open topic in Republik of Srpska, but in the future it will undoubtedly attract the attention of forestry researchers, as the importance of these micropopulated downed deadwoods for forest science is increasing.

REFERENCES

1. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. A Global Overview of Drought and Heat-induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests. *For. Ecol. Manage.*, 2010, vol. 259, pp. 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
2. Bauhus J., Baber K., Müller J. *Dead Wood in Forest Ecosystems*. Oxford bibliographies, 2018, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1093/obo/9780199830060-0196>
3. Brang P. Ecological Niches of Seedling Establishment in High-elevation Forests. *In Sicamous Creek Silvicultural Systems Project. Workshop Proceedings*. April 24–25, 1996, Kamloops, British Columbia, Canada. Edited by Chris Hollstedt and Alan Vyse, Working Paper 24. Victoria, BC, Research Branch, British Columbia Ministry of Forests, 1997, pp. 144–153.
4. Castellani C., Scrinzi G., Tabacchi G., Tosi V. *Inventario Forestale Nazionale Italiano (IFNI)*. Tavole di Cubatura a Doppia Entrata. Trento, Italy, Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura, 1984, pp. 71–75. (In It.).
5. Christensen M., Hahn K., Mountford E.P., Odor P., Standova' r T., Rozenbergar D., Diaci J., Wijdeven S., Meyer P., Winter S., Vrska T. Dead Wood in European Beech (*Fagus Sylvatica*) Forest Reserves. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 210, pp. 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.032>
6. Christie D.A., Armesto J.J. Regeneration Microsites and Tree Species Coexistence in Temperate Rain Forests of Chiloé Island, Chile. *Journal of Ecology*, 2003, vol. 91.5., pp. 776–784. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00813.x>
7. Govedar Z. *Načini Prirodnog Obnavljanja Mešovitih Šuma Jele i Smrče (Abieti Piceetum Illyricum) na Području Zapadnog Dela Republike Srpske*. Doktorska disertacija. Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2005, pp. 1–300. (In Serb.).
8. Govedar Z., Vojislav D., Danijela P., Srđan K. Dinamika Nastajanja Otvora Sklopa Sastojina u Dinarskoj Prašumi «Lom». *Glasnik Šumarskog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci*, 2012, 16, str. 45–60. (In Serb.).
9. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack K., Cummins K.W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. *Adv. Ecol. Res.*, 1986, vol. 15, pp. 133–302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60121-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60121-X)
10. Hartman T. *Gozdni Rezervati Slovenije – Pragozd Rajhenavski Rog*. Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Biotehnika fakulteta, Ljubljana, 1987, p. 99. (In Serb.).
11. Jönsson A.M., Harding S., Barring L., Ravn H.P. Impact of Climate Change on the Population Dynamics of *Ips Typographus* in Southern Sweden. *Agric. For. Meteorol.*, 2007, vol. 146, pp. 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.05.006>
12. Kimmins J.P. *Forest Ecology, Third edition*. University of British Columbia, Vancouver, 2003, 720 p.
13. Klinka K., Green R.N., Trowbridge R.L., Lowe L.E. *Taxonomik Classification of Humus Forms in Ecosystems of British Columbia First Approximation*. Province of British Columbia Ministry of Forests, 1981, pp. 1–54.
14. Korpel S. *Die Urwalder der Westkarpaten*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1995, Germany. (In Ger.).
15. Korpel S. Razvoj i Struktura Bukovo-jelovih Prašuma i Njihova Primjena Kod Gospodarenja Prebornom Šumom. *Šumarski list*, 1996, vol. 119, CXX (3 - 4), pp. 203–208. (In Serb.).
16. Krehan H. Das Tannensterben in Europa. Eine Literaturstudie mit Kritischer Stellungnahme. *FBVA Berichte*, 1989, p. 39. (In Germ.).

17. Luysaert S., Detlef Schulze E., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth Forests as Global Carbon Sinks. *Nature*, 2008, vol. 455, pp. 213-215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
18. Martin M., Fenton N.J., Morin H. Tree-related Microhabitats and Deadwood Dynamics Form a Diverse and Constantly Changing Mosaic of Habitats in Boreal Old-growth Forests. *Ecol. Indic.*, 2021, vol. 128, pp. 107–813. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107813>
19. Mason F. *Dinamica di una Foresta della Pianura Padana, Bosco della Fontana*. Seconda edizione con linee di gestione forestale. Rapporti scientifici 1. Centro Nazionale Biodiversità Forestale “Bosco Fontana”, Verona. Arcari Editore, Mantova, 2004, p 224. (In It.).
20. Meier E.S., Lischke H., Schmatz D.R., Zimmermann N.E. Climate, Competition, and Connectivity Affect Future Migration and Ranges of European Trees. *Glob Ecol Biogeogr*, 2012, 21, pp. 164–178.
21. Merganičová K., Merganič J., Svoboda M., Bače R., Šebeň V. *Deadwood in Forest Ecosystems*. Blanco J.A., Lo Y.H. (eds.). Forest Ecosystems – More than Just Trees. 2012, Rijeka, InTech, pp. 81–108. <https://doi.org/10.5772/31003>
22. Milin Ž. Istraživanje Elemenata Strukture u Bukovoj Sastojini Karaktera Prašume u Južnom Kučaju. Research of Structure of Virgin European Beech Stand at Južni Kučaj. *Glasnik Šumarskog fakulteta*, 1954, vol, 7, pp. 37–72. (In Serb.).
23. Motta R., Garbarino M., Berretti R., Meloni F., Nosenzo A., Vacchiano G. Development of Old-growth Characteristics in Uneven-aged Forests of the Italian Alps. *European Journal of Forest Research*, vol. 134 (1), 19–31. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0830-6>
24. Narukawa Y., Iida S., Tanouchi H., Abe Sh., Yamamoto Sh-Ich. State of Fallen Logs and the Occurrence of Conifer Seedlings and Saplings in Boreal and Subalpine Old-growth Forests in Japan. *Ecological Research*, 2003, vol. 18.3., pp. 267–277. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2003.00553.x>
25. Seibold S., Bässler C., Brandl R., et al. Microclimate and Habitat Heterogeneity as the Major Drivers of Beetle Diversity in Dead Wood. *Journal of Applied Ecology*, 2016, vol. 53.3., pp. 934–943. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12607>
26. Siitonen J. Forest Management, Coarse Woody Debris and Saproxylic Organisms: Fennoscandian Boreal Forests as an Example. *Ecological Bulletins*, 2001, vol. 49, pp. 11–41.
27. Söderström L. Sequence of Bryophytes and Lichens in Relation to Substrate Variables of Decaying Coniferous Wood in Northern Sweden. *Nordic Journal of Botany*, 1988, vol. 8.1., pp. 89–97. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1988.tb01709.x>
28. Stefanović V., Beus V., Burlica Č., Dizdarević H., Vukorep I. *Ekološko – Vegetacijska Rejonizacija Bosne i Hercegovine*. Radovi Šumarskog Fakulteta Univerziteta U Sarajevu, 1983, vol. 17, no. 1, pp. 1–83. (In Serb.). <https://doi.org/10.54652/rsf.1983.v1.i17.275>
29. Takahashi M., Sakai Y., Ootomo R., Shiozaki M. Establishment of Tree Seedlings and Water-soluble Nutrients in Coarse Woody Debris in an Old-growth Picea-Abies Forest in Hokkaido, Northern Japan. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 30.7., pp. 1148–1155. <https://doi.org/10.1139/x00-042>
30. Tyrrell L.E., Crow T.R. Dynamics of Dead Wood in Old-growth Hemlock-hardwood Forests of Northern Wisconsin and Northern Michigan. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, vol. 24.8., pp. 1672–1683. <https://doi.org/10.1139/x94-216>
31. Zanellaa A., Ponge J.Ph., Gobat J.M., Juilleret J., Blouin M., Aubert M., Chertov O., Rubio J.L. Humusica 1, Article 1. Essential Bases – Vocabulary. *Applied Soil Ecology*, 2018, vol. 122, pp. 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.07.004>
32. Караџић Д. Улога и Значај Патогених Гљива у Сушењу Букве у Србији // Шумарство. 2012. № 1–2. С. 1–16. (In Serb.).

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*22+630*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-103-114

Эффективность рубок ухода в лиственнично-еловых насаждениях в северной подзоне европейской части России

Е.А. Сурина[✉], канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAD-6192-2019](https://orcid.org/0000-0002-8159-8977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-8977>

Н.С. Минин, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AHD-5236-2022](https://orcid.org/0000-0002-2926-1146),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2926-1146>

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; surina_ea@sevniilh-arh.ru[✉], n.minin@sevniilh-arh.ru

Поступила в редакцию 18.05.22 / Одобрена после рецензирования 04.08.22 / Принята к печати 12.08.22

Аннотация. Проведены исследования на стационарных пробных площадях (Архангельская область, Северное участковое лесничество, Обозерское лесничество) в березово-еловых насаждениях со 2-м ярусом ели. Пробные площади закладывались с 1966 г. и отличались интенсивностью осуществлявшихся на них уходов. Результаты анализировали, соотнося с данными 6 ранее проведенных учетов (в 1966, 1974, 1986, 2001, 2010, 2020 гг.) для постоянных пробных площадей 1К и 2РУ и 5 учетов (1974, 1986, 2001, 2010, 2020 гг.) для постоянной пробной площади 19. При отсутствии уходов в молодняках в возрасте 20–30 лет (постоянная пробная площадь 1К) дальнейший рост ели сдерживался, усилились конкуренция между деревьями, напряженность роста. Береза оказала биофизическое влияние на ель. Проведение рубок ухода различной интенсивности позволило сформировать наиболее продуктивный древостой на постоянной пробной площади 2РУ. Суммарный запас древостоя здесь максимальный – 435 м³/га, средняя высота за весь период роста также максимальная. По запасу ель преобладает, однако все еще располагается во 2-м ярусе, но со временем выйдет в 1-й. По результатам исследования выделили 3 этапа формирования древостоя. Первый, этап возникновения, характеризуется преобладанием березы и ели по площади, восстановлением ели, продолжающимся 15–25 лет. В течение этого этапа создаются благоприятные условия для поселения ели и ее выживания. Второй этап сопровождается ухудшением условий роста ели, поскольку интенсивно идут дифференциация березового яруса и рост березы. Продолжительность этапа – 70–90 лет. В итоге формируется новый биогеоценоз, смешанный по составу. Заключительный, третий, этап длится до образования чистого по составу ельника. Рубки ухода в естественных молодняках нужно рассматривать как мероприятие, обеспечивающее надежное восстановление лесов хвойными породами с затратами средств и труда, значительно меньшими, чем при полном искусственном лесовосстановлении.

Ключевые слова: береза, ель, рубки ухода, формирование древостоя, лесное хозяйство, северо-таежный лесной район, продуктивность

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований. Регистрационный номер темы: АААА-А20-120013090061-7, 121020500249-6.

Для цитирования: Сурина Е.А., Минин Н.С. Эффективность рубок ухода в лиственнично-еловых насаждениях в северной подзоне европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 103–114. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-103-114>

Original article

Efficiency of Thinning in Deciduous-Spruce Forest Stands in the Northern Taiga Forest Region of the European Part of the Russian Federation

Elena A. Surina[✉], Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAD-6192-2019](https://orcid.org/0000-0002-8159-8977),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8159-8977>

Nikolay S. Minin, Candidate of Agriculture, ResearcherID: [AHD-5236-2022](https://orcid.org/0000-0002-2926-1146),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2926-1146>

Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; surina_ea@sevniilh-arh.ru[✉], n.minin@sevniilh-arh.ru

Received on May 18, 2022 / Approved after reviewing on August 4, 2022 / Accepted on August 12, 2022

Abstract. Research on permanent sample plots (Arkhangelsk, Northern district forestry, Obozerskoye forestry) in birch and spruce stands with an understory layer of spruce was carried out. The sample plots were established since 1966 and differed in the intensity of thinning. The results were analyzed by correlating them with the data of 6 previously conducted surveys (in 1966, 1974, 1986, 2001, 2010, 2020) for permanent sample plots 1K and 2RU and 5 surveys (1974, 1986, 2001, 2010, 2020) for permanent sample plot 19. In the absence of maintenance in young stands aged 20–30 years (permanent sample plot 1K), further growth of spruce was inhibited, competition between trees increased, and growth tension increased. Birch had a biophysical impact on spruce. Carrying out thinning of various intensities made it possible to form the most productive forest stand on the permanent sample plot 2RU. The total stand stock here is maximum – 435 m³/ha, the average heights for the whole growth period is also maximum. In terms of stock, spruce prevails, however, it is still located in the understory forest level, but will eventually enter the canopy forest level. According to the results of the study, three stages of stand formation were identified. The first stage, the stage of emergence, is characterized by the predominance of birch and spruce over the area, spruce regeneration lasting 15–25 years. In the process of passing this stage, favorable conditions for spruce settlement and its survival are created. The second stage is accompanied by deterioration of spruce growth conditions, as the birch layer differentiation and birch growth are intensively going on. The duration of the stage is 70–90 years. As a result, a new mixed biogeocenosis is formed. The final third stage lasts until the formation of a pure spruce forest. Thinning in natural young forest stands should be considered as a measure providing reliable restoration of forests with coniferous species with costs and labor much less than in case of full artificial reforestation.

Keywords: birch, spruce, thinning, stand formation, forestry, northern taiga forest region, productivity

Acknowledgements: The publication is based on the results of the research carried out within the framework of the state assignment of FBU "SevNIILKh" for applied scientific research. Subject registration number: AAAA-A20-120013090061-7, 121020500249-6.



For citation: Surina E.A., Minin N.S. Efficiency of Thinning in Deciduous-Spruce Forest Stands in the Northern Taiga Forest Region of the European Part of the Russian Federation. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 103–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-103-114>

Введение

Важнейшей задачей современного лесоводства является повышение продуктивности лесов и рациональное использование лесных ресурсов. Особая острота вопроса в условиях таежной зоны объясняется интенсивной эксплуатацией на этой территории спелых насаждений, заметной диспропорцией между вырубаемыми площадями с одной стороны и объемами работ по лесовосстановлению и уходу за лесом с другой [1–4]. Как следствие, лесоустроительные материалы при повторной ревизии объектов фиксируют заметное увеличение площадей, занятых лиственными породами. Смена пород в лесах Европейского Севера носит четко выраженный направленный характер: спелые сосняки и ельники после сплошных рубок и пожаров возобновляются по большей части березой и осиной. Доля спелых и перестойных лесов существенно сократилась, а молодых вторичных лесов – увеличилась [5, 6]. Восстановление хвойных в составе древостоев протекает крайне медленно. Изменилась не только породная и возрастная структура лесов, но и на 50–60 % снизилась их продуктивность, на 30–40 лет увеличился оборот рубки, в целом снизились биологическая устойчивость и полезные свойства лесных экосистем. Для сохранения биоразнообразия бореальных лесов и функционирования экосистемы, а также для получения возможности дальше пользоваться услугами, предоставляемыми обществу лесным биомом, крайне важно следить за структурой и составом лесов. Это требует управления лесами после различных нарушений и использования множества методов для ухода за лесами [7, 11, 12, 14, 16, 17]. Последние исследования показывают, что смешанные сосново-еловые древостои более продуктивны, чем чистые хвойные насаждения [15]. Необходимы простые инструменты для оценки различных альтернативных методов управления динамикой лесов и предоставляемыми лесами экосистемными услугами для людей [13].

Анализ результатов рубок ухода в молодняках свидетельствует о некоторых недостатках этих мероприятий, определяемых как субъективными, так и объективными причинами. Необходимость осветления и прочистки до 10–20-летнего возраста древостоя обосновывается биологическими закономерностями формирования и роста насаждений. В условиях Севера только период возобновления хвойных растягивается на 15–20 лет. В связи с сокращением сплошных рубок в последние 15 лет и длительным периодом возобновления хвойных меняется возрастная структура формирующихся вторичных лесов. Площадь молодняков в предстоящее десятилетие будет сокращаться, а накопленный фонд насаждений окажется в значительной степени представленным средневозрастными древостоями.

Лесной фонд вторичных лесов Европейского Севера обладает большими ресурсами для организации рационального лесопользования. Рациональной следует считать организацию специализированных целевых хозяйств с оборотами рубки, ориентированными на конкретные сортименты. Требуется оценка качества

лесов, формируемых рубками ухода, с разными социальными и экологическими функциями. При этом ключевым вопросом является разработка и анализ экономически обоснованных вариантов ведения хозяйства на весь цикл лесовыращивания и лесопользования. При долгосрочной эксплуатации лесов это направление работ имеет большое многоплановое значение как с лесоводственной, так и с экономической точек зрения [8–10, 18–20].

Рубки ухода дают возможность найти оптимальный режим для создания благоприятных условий восстановления и роста хвойных насаждений, тем самым организовать рациональное использование и целевое формирование лесов. До сих пор отсутствует региональная нормативная база по их проведению.

Цель исследования – оценить особенности формирования древостоев после проведения рубок ухода разной интенсивности в лиственно-еловых насаждениях в северо-таежном лесном районе.

Объекты и методы исследования

Стационарные пробные площади (Архангельская область, Северное участковое лесничество, Обозерское лесничество) для проведения рубок ухода и дальнейшего изучения их результатов заложены в 1966 г. сотрудниками Архангельского института леса и лесохимии (сегодня – Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства), руководитель – Г.А. Чибисов. В то время насаждения представляли собой молодняки послепожарного происхождения. Заложено несколько секций, отличавшихся интенсивностью проводимых уходов. Одна секция охватывала как минимум 300 деревьев преобладающей породы.

На постоянной пробной площади (ППП) 2РУ березово-еловые древостои пройдены рубками ухода равномерно по всей территории, когда возраст древостоя составлял 23 года. До проведения рубок ухода в 1-м ярусе насчитывалось до 16 тыс. шт./га березы, а во 2-м – 42 тыс. шт./га ели. В 1-й прием интенсивность рубки по числу стволов составила 80 % по березе и 65 % по ели. Задачами 1-х приемов рубок ухода было удалить все сопутствующие породы, следить за развитием елового элемента леса в отсутствие затеняющих компонентов древостоя. Через 7 лет выполнен 2-й уход, а через 20 – 3-й. Через 35 лет после 1-го ухода осталось 350 шт./га березы, 2,4 тыс. шт./га ели высотой 10,5 м; через 54 года – 329 шт./га березы и 2,1 тыс. шт./га ели высотой 13 м. Насаждения на участках, формирующихся под влиянием рубок ухода, представляют собой древостои с преобладанием хвойных пород. На ППП 2РУ формируется 2-ярусный древостой. В 1-м ярусе сосна и береза имеют запас 125 и 140 м³/га соответственно, 2-й ярус представлен елью с запасом 170 м³/га.

На ППП 19 для сравнения двумя приемами рубок ухода в возрасте 27 и 40 лет был сформирован чистый еловый древостой, причем при 1-м приеме (27 лет) была удалена вся береза и 62 % ели. Удаление березы в ходе 2 приемов рубок создало условия для формирования чистого по составу хвойного насаждения. При последнем учете на этой ППП зафиксировано 12 деревьев сосны старшего поколения, которые не погибли при пожаре в 30-х гг., диаметр этих деревьев – от 24 до 44 см, запас – 107 м³/га, они не были учтены при 1-х пяти учетах.

В качестве контроля была заложена ППП 1К. Насаждение на ней представляет собой сложный по составу березняк с участием как ели, так и со-

сны до 2 ед. состава. Класс бонитета по березе (преобладающей породе) – IV. В верхнем ярусе – сосна и береза со средними высотами 17,6 и 17,0 м соответственно. Во 2-м ярусе располагается ель, ее средняя высота – 8,8 м. Полнота с учетом ярусов – более 1,0. Запас – 210 м³/га. В контрольном древостое через 35 лет было 3,4 тыс. шт./га березы и 7 тыс. шт./га ели высотой около 3,0 м; через 74 года осталось 1136 шт./га ели высотой 8,8 м.

В 2020 г. на постоянных объектах проведены исследования с использованием общепринятых лесоводственно-таксационных методик, которые применялись при всех предыдущих учетах.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований на ППП 1К и 2РУ проанализированы с использованием данных, полученных в ходе 6 ранее проведенных учетов (1966, 1974, 1986, 2001, 2010, 2020 гг.); на ППП 19 – 5 учетов (1974, 1986, 2001, 2010, 2020 гг.). Тип леса на всех ППП – черничник свежий. В табл. 1 приведена динамика таксационных показателей по годам исследований. Длительность опытов позволяет сохранять методологическую преемственность в сборе и обработке информации.

При сравнении вариантов насаждений на разных секциях, пройденных рубками ухода при формировании березово-еловых насаждений, установлено следующее:

1. При отсутствии уходов в молодняках в возрасте 20–30 лет (вариант ППП 1К) дальнейший рост ели сдерживается, усиливаются конкуренция между деревьями, напряженность роста. Береза оказывает биофизическое влияние на ель.

2. Проведение рубок ухода различной интенсивности позволило сформировать наиболее продуктивную древостой в варианте ППП 2РУ. Суммарный запас древостоя максимальный – 435 м³/га, средняя высота за весь период роста также максимальная. По запасу ель преобладает, однако располагается во 2-м ярусе. Средняя высота ели за последние 2 периода исследования составила 12–14 м, березы и сосны – более 20 м. Скорее всего, со временем ель выйдет в 1-й ярус.

3. В чистом ельнике, вариант ППП 19, запас ели увеличивался с той же скоростью, что и на ППП 2РУ. Это хорошо прослеживается в период роста 45–65 лет. К 100 годам запас ели в данном варианте будет выше, чем в древостое на ППП 2РУ, но для точной оценки потребуются проведение дальнейших наблюдений за ростом насаждений.

В контроле отмечено относительно равномерное снижение густоты, пропорционально первоначальной по разным породам. Количество экземпляров ели за 54 года наблюдений снизилось с 42 тыс. до 1 тыс. шт./га.

В насаждениях ППП 2РУ и 19 результаты проведения рубок ухода четко прослеживаются. Здесь данные динамики прежде всего дополнены значениями показателей «после рубки», благодаря чему значение численности изменяется довольно резко. На ППП 2РУ наиболее ощутимые снижения густоты приходятся на 1-й и 2-й приемы рубок ухода (1966, 1974 гг.). За это время густота ели снизилась с 40 тыс. до нескольких тыс. шт./га. Густота березы и сосны также уменьшилась в результате проведения прореживаний.

Таблица 1

Динамика таксационных показателей древостоев на пробных площадях
Dynamics of taxation indices of stands on sample plots

№ ППП вариант опыта	Показатель	Порода	Год учета возраст елового компонента, лет						
			1966 20	1974 28	1986 40	2001 55	2010 64	2020 74	
IK контроль	Число стволов, шт./га	С	1580	1500	640	280	147	142	
		Б	15 630	13 300	5640	3360	1198	936	
		Е	42 100	39 800	10 600	7080	1156	1136	
	Средняя высота, м	С	5,0	10,0	14,0	16,7	17,0	17,6	
		Б	5,9	8,0	16,2	17,7	16,7	17,0	
		Е	1,1	1,5	2,8	2,9	8,4	8,8	
	Средний диаметр, см	С	4,1	6,2	8,9	12,6	16,8	18,2	
		Б	3,0	4,0	7,6	10,7	14,6	16,3	
		Е	2,0	0,7	2,9	3,4	8,4	9,0	
	Сумма площадей сечений, м ² /га	С	2,1	4,6	4,0	3,5	2,4	3,7	
		Б	11,3	16,0	25,2	30,0	14,9	19,6	
		Е	Нет данных	Нет данных	7,0	9,6	6,3	7,2	
Запас, м ³ /га	С	10,0	25,0	28,0	25,0	20,0	28,0		
	Б	36,0	78,0	209,0	257,0	114,0	151,0		
	Е	1,0	4,0	22,0	25,0	30,0	31,0		

Окончание табл. 1

2ру 3 приема	Число стволов, шт./га	С	1570*	610**	283***	117	206	185
		Б	15 560*	2720**	917***	350	391	329
		Е	42 120*	14 582**	2950***	2423	2657	2100
	Средний диаметр, см	С	4,0	6,8	13,0	21,2	25,9	27,7
		Б	3,0	6,7	12,3	18,7	21,0	23,2
		Е	2,1	1,1	5,7	9,5	11,1	12,3
	Средняя высота, м	С	5,0	9,5	12,5	20,0	22,0	25,4
		Б	5,9	9,5	14,3	19,3	21,2	23,0
		Е	1,2	2,1	5,6	10,5	13,8	13,0
	Сумма площадей сечений, м ² /га	С	2,0	2,2	3,8	2,9	10,8	11,1
Б		11,6	7,3	10,9	9,7	13,5	13,8	
Е		Нет данных	Нет данных	7,6	17,1	25,7	24,7	
Запас, м ³ /га	С	10,0	10,0	26,0	28,0	112,0	125,0	
	Б	36,0	36,0	76,0	85,0	126,0	140,0	
	Е	1,1	6,0	31,0	94,0	180,0	170,0	
19 2 приема	Число стволов, шт./га	Е	–	5300****	2914*****	2514	2480	2480
	Средняя высота, м	Е	–	0,8	3,7	73	9,5	11
	Средний диаметр, см	Е	–	0,9	4,1	7,4	9,3	10,6
	Сумма площадей сечений, м ² /га	Е	–	Нет данных	5,1	10,8	16,7	21,7
	Запас, м ³ /га	Е	–	0,8	16	51	106	132
		Е	–	–	–	–	–	–

*До 1-го приема рубок. **На момент проведения 2-го приема рубок ухода. ***На момент проведения 3-го приема рубок ухода. ****После 1-го приема рубок ухода. *****После 2-го приема рубок ухода.

Для насаждения на ППП 19, которая создана позднее (1974 г.) 1-й прием рубки ухода пропущен. Однако из условий проведенного эксперимента следует, что молодняк на этой площади имеет такие же характеристики, как и на ППП 1К и 2РУ. После рубки ухода в 1974 г. густота ели на данной территории соответствовала густоте на ППП 2РУ.

На момент исследования в 1986 г. густота ели на ППП 2РУ и 19 довольно близка – составляет от 3 до 5 тыс. шт./га, в то время как в контроле густота сохраняется на уровне 10 тыс. шт./га – в 2 раза выше по сравнению с ППП 2РУ и 19. К моменту последнего исследования (к возрасту насаждений 70–80 лет) численность ели на разных секциях неодинакова: наименьшая – в контрольной секции (около 936 шт./га), наибольшая – в насаждении на ППП 19 (около 2500 шт./га).

В целом зафиксирована положительная динамика по среднему диаметру, она сохраняется. В отличие от данных по среднему диаметру такой показатель, как средняя высота, прослеживается с момента 1-х учетов. Высота – важная таксационная характеристика, отражающая общую продуктивность насаждения. На рассматриваемых объектах выражена ярусность формирующихся насаждений. В контрольной секции, где древостой развивается с участием сопутствующих пород (береза), ярусность присутствует на всем протяжении периода наблюдений. Средние высоты березы и сосны превышают среднюю высоту ели в 1,5–2 раза. Эта разница наблюдается в течение нескольких периодов исследования.

Еловый компонент насаждения в контрольной секции, развивающийся под пологом березы, довольно долго имел низкую среднюю высоту. Однако с 50–60 лет (2001, 2010 гг.) средняя высота ели стала заметно возрастать. Это связано с процессом отпада березы, что успешно используется елью для роста. Средний возраст березы составляет в этот период 60–70 лет. Наибольшей высоты ель достигла на ППП 2РУ – почти 15 м по данным учета 2010 г. Такой высоты не отмечалось в чистом еловом насаждении (ППП 19), там средний показатель на момент обследования 2020 г. чуть превышал 10 м.

Абсолютная полнота тесно связана с запасом древостоя. С возрастом она увеличивается. Абсолютная полнота по 3 секциям колеблется от минимальной до 30 м²/га. Наибольшее значение показателя достигается березовым компонентом древостоя в контрольной секции при возрасте насаждения около 50–60 лет (2001 г.). В дальнейшем – к возрасту 70–80 лет – полнота березы начинает снижаться. Абсолютная полнота ели и березы здесь колеблется в пределах 2–10 м²/га. На ППП 2РУ ощутимое изменение данного показателя характерно для елового компонента. В 2010 г. наибольшее значение достигается в древостое возрастом 60–70 лет. При последнем обследовании 2020 г. выявлено заметное снижение полноты елового элемента леса. Для других пород (сосна, береза) этот показатель существенно уменьшался после рубок ухода 1966, 1974 и 1986 гг., а затем плавно нарастал.

В чистом ельнике наблюдается закономерное увеличение абсолютной полноты преобладающего елового компонента, с небольшим замедлением темпов к моменту последнего учета. Проведение 2 приемов рубки ухода незначительно отразилось на значениях показателя в этом древостое. Основное внимание при проведении уходов было сосредоточено на удалении деревьев сопутствующих пород. Примечательно, что в ходе последних 2 обследований обнаружена береза, которая представлена деревьями нового поколения.

Динамика запаса в наибольшей степени отражает характерные особенности высоты и абсолютной полноты. Общий вид динамики в целом соответствует отмеченным нами особенностям. В березняке ППП 1К наибольший объем запаса приходится на березу. Причем выражено его резкое нарастание к возрасту 50–60 лет. В возрасте 55 лет запас березы превышал 250 м³/га. При этом запас ели выражался незначительной величиной и варьировал от 10 до 35 м³/га. Запас сосны также сохранялся на стабильно низком уровне – 30–40 м³/га. Влияние рубок ухода на снижение запаса, в отличие от густоты, незначительное. Изменение соотношения пород, увеличение пространства для ценных ели и сосны за счет интенсивной вырубке березы из верхнего яруса – основные задачи рубок ухода в древостое возрастом 30–40 лет. На ППП 19 формируется чистое по составу хвойное насаждение. Наиболее высокий запас за период 1986–2020 гг. отмечался на ППП 2РУ. Класс бонитета для исследованных березово-еловых насаждений по ели и березе приведен отдельно (табл. 2).

Таблица 2

Изменение класса бонитета ели и березы по годам учета
Change of spruce and birch quality class by years of recording

Показатель	Год учета возраст, лет					
	1966 20	1974 28	1986 40	2001 55	2010 64	2020 74
Ель <i>ППП 1К</i>						
Высота	1,1	1,5	2,8	2,9	8,4	7,5
Бонитет	–	–	Va	Va	V	Va
<i>ППП 2РУ</i>						
Высота	1,2	2,1	5,6	10,5	13,8	12
Бонитет	–	–	V	IV	III	IV
<i>ППП 19</i>						
Высота	–	0,9	3,1	7,3	9,5	10,5
Бонитет	–	–	Va	V	V	V
Береза <i>ППП 1К</i>						
Высота	5,9	8	16,2	17,7	16,7	15,5
Бонитет	–	–	I	II	III	IV
<i>ППП 2РУ</i>						
Высота	5,9	9,5	14,3	12,3	21,2	21,3
Бонитет	–	–	II	IV	II	II

Ель является преобладающей породой в древостое на ППП 2РУ, класс бонитета III–IV, что свидетельствует о хорошей продуктивности. На ППП 19 класс бонитета не выше V. В контроле бонитет березы снизился до IV класса к 70 годам, хотя в 40–50 лет древостой относится к I–II (табл. 2).

В варианте с 3 уходами (ППП 2РУ) последние 2 десятилетия в составе древостоя преобладает ель, на долю березы приходится менее 50 % от общего запаса. Продуктивность данного древостоя можно считать высокой, поскольку класс бонитета повысился с IV до II.

Выводы

На основании проведенных постоянных длительных наблюдений на стационарных объектах (50–60 лет) установлено следующее:

1. На Европейском Севере естественный метод возобновления лесов является основным на площадях сплошных рубок и гарях. Эффективность естественного и искусственного восстановления может быть обеспечена, если оно будет управляемым от начального этапа и до надежного формирования молодняка нужного хозяйственного состава. В настоящее время лесовосстановление, к сожалению, это, как правило, понятие лишь теоретическое, а на практике – стихийный процесс. Основным хозяйственным мероприятием по восстановлению хозяйственно-ценных лесов являются рубки ухода. Они могут ускорить смену породного состава (лиственно-еловые насаждения) и предотвратить смену пород (лиственно-сосновые насаждения), оптимизировать условия восстановления и рост хвойных пород.

2. Рубки ухода в естественных молодняках нужно рассматривать как лесокультурное мероприятие, обеспечивающее надежное восстановление лесов хвойными породами с затратами средств и труда, значительно меньшими, чем при полном искусственном лесовосстановлении.

3. Уход в молодняках следует относить к лесовосстановительным мероприятиям и обязать лесопользователей к проведению данных мероприятий, не увязывая их с обязательной реализацией получаемой продукции.

4. Лесовыращивание невозможно без целевых рубок ухода. Они должны рассматриваться в единой связи с главными рубками, как предшествующими, так и последующими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Буньков Н.А. Анализ возобновления лиственницы естественным путем в различных вариантах рубок в Северо-Тажном районе Европейской части РФ // Лесная наука современности: VI Мелеховские науч. чтения, посвящ. 115-летию со дня рождения выдающегося ученого-лесоведа, акад. Ивана Степановича Мелехова / отв. ред. С.В. Любова; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2020. С. 92–97.

Bunkov N.A. Analysis of Natural Regeneration of Larch in Different Felling Variants in the North Taiga Region of the European Part of the Russian Federation. *Forest Science of Our Time. VI Melekhov Scientific Readings dedicated to the 115th anniversary of the birth of an outstanding forestry scientist, academician Ivan Stepanovich Melekhov*. Executive Editor S.V. Lyubova; Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk, 2020, pp. 92–97. (In Russ.).

2. Вахтомина М.Н. Формирование сосняков под влиянием рубок ухода в Обозерском лесничестве // Ломоносовские науч. чтения студентов, аспирантов и молодых ученых ВШЕНиТ САФУ – 2020: сб. материалов конф. / сост. А.С. Волков; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2020. С. 23–26.

Vakhtomina M.N. Formation of Pine Forests under the Influence of Thinning in Obozersky Forestry. *Materials of conferences held within the framework of Lomonosov scientific readings of students, graduate students and young scientists of the Higher School of Natural Sciences and Technology*. Arkhangelsk, 2020, pp. 23–26. (In Russ.).

3. Екимова Д.В. Естественное возобновление в сосновых и еловых типах леса в Емцовском учебно-опытном лесхозе // Ломоносовские науч. чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2018: сб. материалов конф. / сост. Ю.С. Кузнецова; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2018. С. 349–352.

Ekimova D.V. *Natural Regeneration in Pine and Spruce Types of Forest in the Emtsovsky Educational and Experimental Forestry*. Materials of conferences held within the framework of Lomonosov scientific readings of students, graduate students and young scientists. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Compiled by J.S. Kuznetsova. Arkhangelsk, 2018, pp. 349–352. (In Russ.).

4. Кайбалдиева М.Н. Ход естественного возобновления в различных типах леса в Емцовском учебно-опытном лесхозе // Ломоносовские науч. чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2019: сб. материалов конф.: в 2 т. / сост. Ю.С. Кузнецова; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2019. Т. 2. С. 174–176.

Kaybaldieva M.N. *Course of Natural Regeneration in Various Types of Forest in the Emtsovsky Educational and Experimental Forestry*. Materials of conferences held within the framework of Lomonosov scientific readings of students, graduate students and young scientists. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Compiled by J.S. Kuznetsova. Arkhangelsk, 2019, iss. 2, pp. 174–176. (In Russ.).

5. Минин Н.С. Особенности изменения надземной фитомассы сосняков искусственного происхождения, формирующихся под влиянием рубок ухода // Экологические проблемы Арктики и Северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. П.А. Феклистов; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2016. Вып. 19. С. 113–123.

Minin N.S. Features of Changes in Aboveground Phytomass of Artificial Pine Forests Formed under the Influence of Thinning. *Environmental Problems of the Arctic and Northern Territories*. Intercollegiate Collection of Scientific Works. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk, 2016. iss. 19, pp. 113–123. (In Russ.).

6. Сурина Е.А., Минин Н.С., Дворяшин А.В. Меры по совершенствованию воспроизводства лесов (рубки ухода) в различных лесорастительных условиях северо-таежного лесного района Европейской части Российской Федерации // Лесная наука современности: VI Мелеховские науч. чтения, посвящ. 115-летию со дня рождения выдающегося ученого-лесоведа, акад. Ивана Степановича Мелехова / отв. ред. С.В. Любова; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2020. С. 52–57.

Surina E.A., Minin N.S., Dvoryashin A.V. Measures to Improve Forest Reproduction (Thinning) in Various Forest Conditions of the Northern Taiga Forest Region of the European Part of the Russian Federation. *Forest Science of Our Time*. VI Melekhov scientific readings dedicated to the 115th anniversary of the birth of an outstanding forestry scientist, academician Ivan Stepanovich Melekhov. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk, 2020, pp. 52–57. (In Russ.).

7. Усманова А.А., Минин Н.С. Формирование и рост смешанных сосняков под воздействием рубок ухода // Экологические проблемы Арктики и Северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. П.А. Феклистов; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2016. Вып. 19. С. 68–71.

Usmanova A.A., Minin N.S. Formation and Growth of Mixed Pine Trees Under the Influence of Thinning. *Environmental Problems of the Arctic and Northern Territories*. Intercollegiate collection of scientific works. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk, 2016, iss. 19, pp. 68–71. (In Russ.).

8. Чибисов Г.А. К проблеме формирования хозяйственно ценных насаждений // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере / отв. ред. Г.А. Чибисов. Архангельск: СевНИИЛХ, 2005. С. 45–56.

Chibisov G.A. To the Problem of Formation of Economically Valuable Plantations. *Issues of Taiga Forestry in the European North*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry, 2005, pp. 45–56. (In Russ.).

9. Чибисов Г.А. Смена сосны елью: моногр. Архангельск: СевНИИЛХ, 2010. 150 с.

Chibisov G.A. *The Change From Pine to Spruce*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry, 2010. 150 p. (In Russ.).

10. Чибисов Г.А., Вялых Н.И., Минин Н.С. Рубки ухода за лесом на Европейском Севере: практ. пособие. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 128 с.

Chibisov G.A., Vyalykh N.I., Minin N.S. *Thinning in the European North: Practical Manual*. Northern Research Institute of Forestry, 2004. 128 p. (In Russ.).

11. Чибисов Г.А., Гуцин В.А., Фомин А.П., Захаров А.Ю. Лесоводственная и экономическая эффективность рубок ухода: практ. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: САФУ, 2011. 108 с.

Chibisov G.A., Guchin V.A., Fomin A.P., Zaharov A.U. *Silvicultural and Economic Efficiency of Thinning: a Practical Manual. 2nd Edition Revised and Enlarged*. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk, 2011. 108 p. (In Russ.).

12. Чибисов Г.А., Неведова А.И. Рубки ухода и фитоклимат: моногр. Архангельск: СевНИИЛХ, 2007. 265 с.

Chibisov G.A., Nefedova A.I. *Thinning and Phytoclimate*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry, 2007. 265 p. (In Russ.).

13. Akujärvi A., Repo A., Akujärvi A. M., Liski J. Bridging Mapping and Simulation Modelling in the Ecosystem Service Assessments of Boreal Forests: Effects of Bioenergy Production on Carbon Dynamics. *Forest Ecosystems*, 2021, vol. 8(4), pp. 1–15. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40663-021-00283-2>

14. Gonzalo de Q., Kuuluvainen T. Tree Diametric-species Diversity is Affected by Human Impact in Old Scots Pine Dominated Forest in Boreal Fennoscandia. *Forest Ecosystems*, 2020, vol. 7(8), 12 p. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0219-6>

15. Gustafsson L., Hannerz M., Koivula M., Shorohova E., Vanha-Majamaa I., Weslien J. Research on Retention Forestry in Northern Europe. *Ecological Processes*, 2020, vol. 9(3). 13 p. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0208-2>

16. Koivula M., Vanha-Majamaa I. Experimental Evidence on Biodiversity Impacts of Variable Retention Forestry, Prescribed Burning, and Deadwood Manipulation in Fennoscandia. *Ecological Processes*, 2020, vol. 9(11), 22 p. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0209-1>

17. Kuuluvainen T., Gauthier S. Young and Old Forest in the Boreal: Critical Stages of Ecosystem Dynamics and Management Under Global Change. *Forest Ecosystems*, 2018, vol. 5(26), 15 p. <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0142-2>

18. Pukkala T. Which Type of Forest Management Provides Most Ecosystem services? *Forest Ecosystems*, 2016, vol. 3(9), 16 p. <https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-016-0068-5>

19. Storch F., Kändler G., Bauhus J. Assessing The Influence of Harvesting Intensities on Structural Diversity of Forests in South-West Germany. *Forest Ecosystems*, 2019, vol. 6(40), 12 p. <https://forestecosyst.springeropen.com/articles/10.1186/s40663-019-0199-6>

20. Surina E.A. Forestry in North-Taiga Forest Region of the European Part of the Russian Federation. *Earth Environ. Sci*, 2021. <https://link.springer.com/article/10.1007/s41939-023-00271-9>

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 625.8:630

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-115-125

Применение канатно-рельсовых дорог для трелевки сортиментов

Ф.В. Свойкин¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

В.Ф. Свойкин¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

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>

С.А. Войнаш³, мл. науч. сотр.; *ResearcherID*: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

С.Е. Арико⁴, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAK-2167-2020](https://orcid.org/0000-0001-6812-8842),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6812-8842>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; svoikin_fv@mail.ru, svoikin_vf@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия, 191186; sokolova_vika@inbox.ru

³Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, Россия, 420008; sergey_voi@mail.ru

⁴Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13 а, Минск, Республика Беларусь, 220006; sergeyariko@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.22 / Одобрена после рецензирования 26.06.22 / Принята к печати 29.06.22

Аннотация. В статье приведены сдерживающие факторы применения традиционных решений для трелевки древесины в зимний лесозаготовительный период в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации. На основе обзора научной литературы дана классификация канатно-рельсовых дорог, рассмотрены способы крепления платформы или вагона к тяговому тросу, особенности выбора троса. Описаны режимы работы канатно-рельсовых дорог (без двигателя – как лесоспуск, с двигателем без замыкающего троса, с двигателем с замыкающим тросом), рассмотрены основные требования к канатно-рельсовым дорогам и факторы, ограничивающие область применения таких дорог. Предложена методика определения движущих сил. Она учитывает вес движущегося по склону вагона, количество вагонов, угол наклона участка пути, сопротивление движению вагона, дополнительное сопротивление движению вагона при прохождении кривых участков, вес троса, его длину, трение троса о землю, шпалы и другие препятствия, которое зависит от состояния верхнего строения пути, густоты укладки шпал, выступающего на поверхность балласта, смазки троса и других факторов. Кроме

© Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А., Войнаш С.А., Арико С.Е., 2023

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

перечисленного принимались во внимание потери мощности от сопротивления путевых роликов при огибании их сбегающей ветвью троса, потери на трение в цапфах барабанов лебедки и на огибание тросом барабанов лебедки. В статье обсуждаются условия, при которых возможно передвижение вагона вниз по склону, исключаются пробуксовки и обеспечиваются торможения троса в канавках барабанов. Определены ограничения применения канатно-рельсовых дорог в зависимости от характера пути, подвижного состава, угла наклона трассы, среднего расстояния трелевки. Предложено техническое решение по усовершенствованию существующих канатно-рельсовых дорог с использованием шарнирно-сочлененной каретки, повышающей эксплуатационные свойства канатно-рельсовых дорог. Описанная в статье конструкция позволяет снизить износ канатов и организовать заготовку лесоматериала, в том числе на непрямолинейных трелевочных волоках с углами поворота до 45°. При этом конструкция шарнирно-сочлененной каретки может эффективно применяться на уже находящихся в эксплуатации канатно-рельсовых дорогах.

Ключевые слова: трелевка, древесина, канатно-рельсовая дорога, каретка, методика, расчет, эксплуатация

Для цитирования: Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Соколова В.А., Войнаш С.А., Арико С.Е. Применение канатно-рельсовых дорог для трелевки сортиментов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 115–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-115-125>

Original article

Application of Cable-Railways for Timber Skidding

Fedor V. Svoikin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

Vladimir F. Svoikin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

Viktoriiia A. Sokolova², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

Sergey A. Voinash³✉, Junior Research Assistant; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

Sergey Ye. Ariko⁴, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAK-2167-2020](https://orcid.org/0000-0001-6812-8842), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6812-8842>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskii per., 5, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation; svoikin_fv@mail.ru, svoikin_vf@mail.ru

²Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Bolshaya Morskaya str., 18, Saint-Petersburg, 191186, Russian Federation; sokolova_vika@inbox.ru

³Kazan Federal University, Kremlin str., 18, Republic of Tatarstan, Kazan, 420008, Russian Federation; sergey_voi@mail.ru✉

⁴Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; sergeyariko@mail.ru

Received on March 22, 2022 / Approved after reviewing on June 26, 2022 / Accepted on June 29, 2022



Abstract. The article presents constraining factors of the use of traditional approaches for timber skidding in the winter logging period in the North-West Federal District of the Russian Federation. Based on the study of scientific literature, the classification of cable-railways is given, methods of fastening the platform or cable car to the traction cable, the peculiarities of cable selection are considered. The modes of operation of cable-railways are described (without an engine – as a timber slide, with an engine without a trailing cable, with an engine with a trailing cable), the basic requirements for cable-railways and factors limiting the scope of application of such roads are considered. A methodology for determining the driving forces is proposed. It takes into account the weight of the car moving on the slope, the number of cars, the angle of inclination of the track section, the resistance to car movement, additional resistance to car movement when passing curves, the weight of the cable, its length, the friction of the cable on the ground, sleepers and other obstacles, which depends on the condition of the track structure, the density of sleeper laying, ballast protruding on the surface, cable lubrication and other factors. In addition to the above, power losses from the resistance of track rollers when they are enveloped by the running down branch of the cable, friction losses in the trunnions of the winch drums and friction losses from the cable enveloping the winch drums were considered. The article discusses the conditions under which it is possible to move the car down the slope, as well as prevent slipping and provide cable braking in the grooves of the drums. Limitations for the use of cable-railways, depending on the nature of the track, rolling stock, slope angle of the track, average skidding distance, are determined. A technical solution to improve the existing cable-railways using an articulated carriage that increases the operational properties of cable-railways, is proposed. The proposed design allows to reduce the wear of cables and to organize timber harvesting, including on non-straight skidding trails with rotation angles up to 45 degrees. At the same time, the design of the articulated carriage can be effectively applied on cable-railways already in operation.

Keywords: skidding, timber, cable-railways, carriage, methodology, calculation, operation

For citation: Svoynkin F.V., Svoynkin V.F., Sokolova V.A., Voinash S.A., Ariko S.Ye. Application of Cable-Railways for Timber Skidding. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 115–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-115-125>

Введение

В настоящее время остро стоит вопрос освоения расчетной лесосеки. Так, в 2019–2020 г. в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации (СЗФО РФ) лесозаготовители не смогли в полном объеме осуществить заготовку леса ввиду неблагоприятных погодных условий. Существующие пути совершенствования процесса заготовки древесины [1, 8, 9] становятся все затруднительнее к применению по ряду динамично изменяющихся факторов. В частности, высокие средние температуры воздуха в зимний период в СЗФО РФ усложняют или делают невозможной заготовку древесины на отведенных в рубку участках. Это приводит к уменьшению объема заготовки древесины на 20 % и более, прямым убыткам лесозаготовительных предприятий региона.

Все больше внимания уделяется исследованию возможности активного внедрения канатно-рельсовых дорог (КРД) и канатных трелевочных установок как в РФ, так и за рубежом [11, 19, 21]. Стоит отметить, что идея использования КРД для трелевки древесины не нова [2], а в связи с неэффективностью традиционных решений для трелевки древесины применение КРД становится все более актуальным [12].

Объекты и методы исследования

Одним из направлений решения проблемы вывоза заготовленной древесины является использование КРД с движущимися тросами. По характеру пути и подвижного состава КРД, часто являясь непосредственным продолжением узкоколейной железной дороги, недорогие, несложные по устройству и могут успешно использоваться для промежуточной транспортировки древесины на расстояния 1000–4000 м на холмисто-рядовых рельефах с уклонами до 25°, когда автомобили, тяжелая колесная и гусеничная агрегатная техника для хлыстовой и сортиментной заготовки неприменимы по разным причинам для условий эксплуатации [3].

Различают КРД с верхней и нижней тягой. В КРД с нижней тягой трос присоединяют к вагону под стержнем буфера на высоте головки рельса (или немного выше) при помощи несложного съемного приспособления – тросоводителя, который заводит трос в ролики на кривых участках, а также в прорези рельсов на разъездах. Дороги с нижней тягой лучше строить в местности с относительно неглубоким снежным покровом (до 0,8–1,0 м), где нет частых метелей и снегопадов, так как ролики затрудняют механизацию снегоочистки на путях. На дорогах с нижней тягой допустимы кривые малого радиуса и выпуклый профиль трассы; совмещение криволинейного пути и вогнутого профиля нежелательно, потому что в этом случае тяговый трос выходит из роликов, пересекает криволинейный участок пути по хорде и может стянуть вагон с рельсов.

На КРД с верхней тягой платформу или вагон прикрепляют чокером к тяговому тросу, а трос идет по верху трассы на мачтах со звездчатыми блоками. Верхнюю тягу обычно применяют на дорогах с непрерывным движением троса в одну сторону. Дороги с верхней тягой чаще всего строят двухпутными. Их целесообразно применять при значительных расстояниях трелевки древесины с лесосек к магистральным дорогам (свыше 2000 м). Такие дороги можно устраивать в местности с глубоким снежным покровом, частыми метелями и снегопадами, так как КРД с верхней тягой не мешает организации механизированной очистки путей. При этом КРД данного вида малочувствительны к кривизне дорожного полотна, не боятся выпуклого и вогнутого профиля трассы, но требуют сложной оснастки мачтами и звездчатыми блоками, что ограничивает их распространение.

В зависимости от движения тягового органа дороги бывают с колебательным, реверсивным движением троса или непрерывным в одну сторону. По роду движущей силы дороги подразделяются на дороги с механической тягой или с лесоспусками (бремсберги).

Применение двухбарабанных лебедок или лебедки с непрерывно движущимся тросом позволяет осуществлять не только спуск груженого вагона по однопутной дороге, но и его перемещение на ровном участке и подъем по склону. Применение барабанов с обычной навивкой троса (для работы колебательным способом) ограничивает длину дороги тросоемкостью грузового и холостого барабанов.

Основные требования к конструкции подвижного состава КРД следующие: не менее 50 % тормозных колес у вагона; однотипность вагонов и оснащение их приспособлениями для быстрого прикрепления и снятия тросоводителей; расположение всех деталей нижней части вагона на 0,10–0,12 м выше

уровня головок рельсов, чтобы они не задевали за ролики и не выламывали их, при этом все тросоводители прикрепляют к вагону на болтах вблизи пружины буфера со стороны основного подъема пути.

Ввиду отсутствия аналогов КРД в СЗФО РФ [6, 7] целесообразность строительства, схема и вид КРД для трелевки древесины в конкретной местности определяются посредством тягового расчета и сравнительного технико-экономического расчета на основании сопоставления экономического эффекта различных видов транспорта и определения технической возможности применения каждого из них. При этом следует учитывать продолжительность рабочего цикла (рейса), который включает время на погрузку вагона (40–60 мин), перемещение (зависит от длины дороги и скорости движения – 0,70–0,83 м/с), подготовительно-заключительное время смены (15–30 мин).

С учетом предложенных ранее технических решений [4, 10, 13–15, 17, 20, 22, 23] следует выделять 3 режима работы КРД:

1. Без двигателя – как лесоспуск, если движущая сила на всем протяжении дороги будет больше сил сопротивления или равна им, при этом составляющая силы тяжести движущегося вниз вагона обеспечивает его передвижение до заданного пункта. Для безопасной работы и предотвращения недопустимых ускорений должна быть обеспечена возможность торможения движущегося вниз вагона на любом участке дороги.

2. С двигателем без замыкающего троса, если движущая сила больше силы сопротивления, а составляющая силы тяжести обеспечивает перемещение вагона вниз до заданного пункта без подтягивания замыкающим тросом. При этом должны быть обеспечены возможность торможения сбегающего вагона за счет сцепления троса на барабане посредством натяжения набегающего троса и возможность подтаскивания порожнего вагона благодаря натяжению в сбегающей ветви за счет груженого вагона и сцепления на тяговом барабане.

3. С двигателем и замыкающим тросом, если движущая сила меньше силы сопротивления или движущие силы на сбегающей ветви не создают достаточного сцепления для подтаскивания вверх порожнего вагона, а также движущийся вниз вагон не преодолеет путевых сопротивлений без подтягивания его замыкающим тросом.

Выбор схемы дороги в окончательном виде уточняют расчетом, при котором определяют силы, действующие в сбегающей ветви троса, исходя из сопротивления движению вагона, поднимающегося по склону [5]. В связи с тем, что скорости на КРД обычно не превышают 1 м/с, ускорениями и силами инерции при расчетах можно пренебречь. Для нормальной работы дороги соотношение между движущимися силами (силы в сбегающей ветви) и силами сопротивления движению (силы в набегающей ветви) нужно обеспечить натяжение ветвей троса, его сцепление с барабанами лебедки и возможность торможения системы. Движущие силы могут создаваться не только гружеными вагонами, но и порожними. В общем случае данную величину определяют по формуле

$$V = \left[Qb \left(\sin \alpha - f_1 \cos \alpha - \frac{425}{1000R} \right) + qL(\sin \alpha - f_2 \cos \alpha) \right] (1 - K_n) f_3,$$

где V – движущая сила вагона, Н; Q – вес вагона, движущегося по склону (вес груза и собственный вес вагона), Н; b – количество вагонов, движущихся по склону, шт.; α – угол наклона участка пути, на котором находится вагон, ...°;

f_1 – коэффициент сопротивления движению вагона (для подвижного состава узкоколейной железной дороги может быть равен 0,005; при плохом состоянии верхнего строения увеличивается до 0,008); $425/1000R$ – дополнительное сопротивление движению вагона при прохождении кривых (R – радиус кривой, м); q – вес 1 пог. м троса сбегающей ветви, Н; L – длина сбегающей ветви троса от лебедки до вагона, м; f_2 – коэффициент трения троса о землю, шпалы и др. (в среднем может считаться равным 0,25 с колебаниями от 0,18 до 0,30 в зависимости от состояния верхнего строения пути, густоты укладки шпал, выступающего на поверхность балласта, влажности грунта, смазки троса и т. п.); K_n – коэффициент, учитывающий потери мощности от сопротивления путевых роликов при огибании их сбегающей ветвью троса (зависит от длины троса, количества и вида роликов, которые огибает трос, и от суммы углов охвата); f_3 – коэффициент, учитывающий потери на трение в цапфах барабанов лебедки и на огибание тросом барабанов лебедки (колеблется от 0,84 до 0,92 в зависимости от диаметра барабана, диаметра и жесткости троса).

Силу сопротивления движению, H , определяют по формуле

$$W = \left[Qb \left(\sin \alpha + f_1 \cos \alpha + \frac{425}{1000R} \right) + q_0 L_1 (\sin \alpha - f_2 \cos \alpha) \right] (1 + K_{n1}) f_3,$$

где q_0 – вес 1 пог. м троса набегающей ветви, кг, равный весу 1 пог. м троса сбегающей ветви; L_1 – длина набегающей ветви троса от лебедки до вагона, м; K_{n1} – коэффициент, учитывающий потери мощности от сопротивления путевых роликов при огибании их набегающей ветвью троса.

Далее осуществляется оценка возможности движения вагона вниз по склону.

Составляющая силы тяжести вагона (при работе без двигателя или с двигателем без замыкающего троса) должна обеспечить не только движение вагона, но и перемещение вслед за вагоном троса и преодоление сопротивления роликов, т. е. должно выполняться неравенство

$$0,84(Qb \sin \alpha + qL \sin \alpha)(1 - K_n) > Qb \cos \alpha \omega + Qb \cos \alpha + \frac{425}{1000R} + qL \cos \alpha f,$$

где ω – коэффициент сопротивления движению вагона.

После определения движущей силы и силы сопротивления движению, а также установления условий, при которых возможно передвижение вагона вниз по склону, необходимо осуществить проверку условия сцепления троса в канавках барабанов во избежание пробуксовок и обеспечения торможения.

Сцепление троса с барабаном лебедки для подтягивания порожнего вагона силою двигателя без пробуксовки будет обеспечено в том случае, если натяжение в сбегающем конце троса равно натяжению в набегающем конце троса или больше его. То есть должно выполняться условие

$$\left[f_3(Qb \sin \alpha + qL \sin \alpha)(1 - K_n) - (Qbf_1 \cos \alpha + Qb \cos \alpha + \frac{425}{1000R} + qLf_2 \cos \alpha) \right] \times \\ \times e^{k\alpha_1} K_3 \geq \left[Qb(\sin \alpha + \frac{425}{1000R} + f_1 \cos \alpha) + q_0 L_1 (\sin \alpha + f_2 \cos \alpha)(1 + K_{n1}) \right],$$

где e – основание натуральных логарифмов; k – коэффициент трения троса в канавках ведущего барабана лебедки (зависит от смазки троса и профиля канавки: при круглых канавках без защемления троса и слабой смазке равен 0,18; в тех же условиях для обильно смазанного троса – 0,10; слегка смазанного – 0,20; полусухого – 0,25 и сухого – 0,30); α_1 – угол охвата тросом ведущего барабана, рад.); K_3 – коэффициент запаса на сцепление канавок с тросом в барабанах лебедки (принимается равным 1,28).

Торможение сбегающего вагона без пробуксовки может быть обеспечено в том случае, если натяжение в сбегающем конце троса с груженым вагоном будет равно натяжению в набегающей ветви троса с порожним вагоном или меньше его, т. е. должно выполняться неравенство

$$f_3 \left[(Qb \sin \alpha + qL \sin \alpha) - (Qbf_1 \cos \alpha + Qb \cos \alpha + \frac{425}{1000R} + qLf_2 \cos \alpha) \right] \times \\ \times (1 - K_n) \leq \left[Qb(\sin \alpha + \frac{425}{1000R} + f_1 \cos \beta) + q_0 L_1(\sin \beta + f_2 \cos \beta)(1 + K_{n1}) \right] e^{k\alpha_1} K_3,$$

где β – угол наклона участка пути, на котором находится вагон, движущийся вверх, ...°.

В приведенных выше выражениях $e^{k\alpha_1}$ учитывает соотношение между натяжениями сбегающей и набегающей ветвей троса на основании уравнения для гибкой нити по Эйлеру [16, 18]:

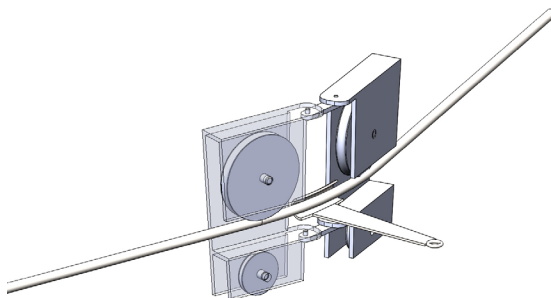
$$T_1 = T_2 e^{f_4 \alpha_1},$$

где T_1 – натяжение набегающей ветви; T_2 – натяжение сбегающей ветви; f_4 – коэффициент трения троса в канавках ведущего барабана лебедки (зависит от смазки троса и профиля канавки; при круглых канавках без защемления троса и слабой смазке f_4 составляет 0,18; в тех же условиях для обильно смазанного троса – 0,10; слегка смазанного – 0,20; в условиях полусухого и сухого трения – 0,25 и 0,30 соответственно).

Значение $e^{f_4 \alpha_1}$ для различных случаев находят из таблиц в зависимости от коэффициента трения f_4 и угла охвата тросом ведущего барабана α_1 .

Результаты исследования и их обсуждение

В результате реализации приведенной методики предполагается конструктивное усовершенствование КРД на основе применения шарнирно-сочлененной каретки (ШСК) разработанной конструкции для непрямолинейных КРД. Данная конструкция обеспечивает прохождение поворотов кареткой с транспортируемыми лесоматериалами на криволинейной трассе. Предлагается использовать конструкции кареток, в которых соединение крепления опорных колесных пар осуществляется парой шарнирных сочленений. При этом формируются 2 независимые каретки, осуществляющие маневрирование по тяговому канату на одном ролике, благодаря которому вагоны без труда проходят повороты пути. Конструкция каретки показана на рисунке [24].



Шарнирно-сочлененная каретка для канатно-рельсовых дорог

Articulated carriage for cable-railways

Стоит отметить существенную конструктивную особенность современных КРД, значительно ограничивающую область применения таких дорог. При ситуации с жестко закрепленным роликом возможен поворот трассы (каната) в плане на очень ограниченный угол (до 10°). При этом использование конструкции с дифференцированными от каретки роликами не представляется возможным, поскольку ось роликов должна быть фиксирована с двух сторон, в результате чего создается невозможность прохождения оттяжки в поворотной точке.

Преимуществом ШСК для КРД является то, что применение ШСК не требует внесения изменений в конструкции существующих КРД, любую существующую КРД возможно доукомплектовать кареткой предлагаемой конструкции.

Расчет конструктивных особенностей предложенной конструкции показывает, что применение КРД с ШСК позволит организовать трассы трелевки без существенного износа канатов с углами поворота до 45° .

Заключение

При выполнении расчета для определения схемы дороги грузный вагон размещают на характерных участках дороги сверху вниз, начиная от лебедки, и, соответственно, перемещают порожний вагон снизу вверх на таком же расстоянии от пункта отцепки вагонов. Дорога может эксплуатироваться по такой схеме, если гарантируется перемещение груза, торможение и сцепление на всех без исключения относительных позициях. Трос для канатно-рельсовой дороги выбирается в зависимости от максимального тягового усилия в набегающей или сбегавшей ветви. Такие ограничения затрудняют вывозку заготовленной древесины.

Использование уточненных режимов канатно-рельсовых дорог с движущимися тросами и шарнирно-сочлененной кареткой предложенной конструкции способствует решению задачи первичной вывозки древесины в условиях повышенных температур воздуха в зимний лесозаготовительный период в Северо-Западном федеральном округе Российской Федерации, непрямолинейных трелевочных волоков с углом поворота до 45° , а также существенно снижает износ канатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Залесов С.В., Мехренцев А.В. Сортиментная заготовка древесины. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 140 с.

Azarenok V.A., Gerts E.F., Zalesov S.V., Mekhrentsev A.V. *Sorted Timber Harvesting*. Ekaterinburg, USFU Publ., 2015. 140 p. (In Russ.).

2. Беляя Н.М., Прохоренко А.Г. Канатные лесотранспортные установки. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 300 с.

Belaya N.M., Prokhorenko A.G. *Rope Forest Transportation Installations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 300 p. (In Russ.).

3. Боярский В.С. Канатно-рельсовые дороги с движущимися тросами на лесозаготовках в горных условиях. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1960. 60 с.

Boyarskiy V.S. *Cable-railways with Moving Cables at Logging in Mountainous Conditions*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1960. 60 p. (In Russ.).

4. Бирман А.Р., Свойкин Ф.В., Королько Н.С., Угрюмов С.А., Вохмянин Н.А., Соколова В.А., Кривоногова А.С. Освоение лесосек со слабонесущими грунтами путем использования канатных установок // Сб. ст. по материалам науч.-техн. конф. ин-та технол. машин и транспорта леса по итогам науч.-исслед. работ 2018 г. / отв. ред. В.А. Соколова. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. С. 71–78.

Birman A.R., Svoikin F.V., Korol'ko N.S., Ugryumov S.A., Vokhmyanin N.A., Sokolova V.A., Krivonogova A.S. Development of Harvesting Areas with Poorly Bearing Soils Through the Use of Rope Installations. *Sbornik statey po materialam nauchno-tekhnicheskoy konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot 2018 goda* = Collection of Articles based on the Materials of the Scientific and Technical Conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the Results of Research Work in 2018, Saint-Petersburg, SPbFTU, 2019, pp. 71–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/SPBFTU.2019.NTK.1>

5. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М.: АСВ, 1995. 568 с.

Vardanyan G.S., Andreyev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. *Resistance of Materials with the Basics of the Theory of Elasticity and Plasticity*. Moscow, Assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 1995. 568 p. (In Russ.).

6. Григорьев И.В., Свойкин Ф.В., Григорьева О.И. Транспортная система для сбора и трелевки древесины в условиях заболоченных лесосек // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Тюмень: ТюмГНГУ, 2016. С. 93–97.

Grigoryev I.V., Svoikin F.V., Grigorieva O.I. Transport System for Collecting and Skidding Timber in Wetland Logging Areas. *Transportnyye i transportno-tekhnologicheskiye sistemy* = Transport and transport-technological systems. Tumen. IUT Publ., 2016. pp. 93–97. (In Russ.).

7. Григорьев И.В., Свойкин Ф.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И. Повышение эффективности освоения заболоченных лесосек в теплый период года // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Второй Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 65-летию высш. лесн. образования в Республике Карелия. Петрозаводск: ПетрГУ, 2016. С. 68–70.

Grigoryev I.V., Svoikin F.V., Grigoryeva O.I., Nikiforova A.I. Improving the Efficiency of the Development of Wetland Logging Areas in the Warm Season. *Povysheniye effektivnosti lesnogo kompleksa: Materialy Vtoroy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 65-letiyu vysshego lesnogo obrazovaniya v Respublike Kareliya* = Improving the efficiency of the forestry complex: Materials of the Second All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, dedicated to the 65th anniversary of higher forestry education in the Republic of Karelia. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2016. pp. 68–70. (In Russ.).

8. Дербин В.М., Дебин М.В. Совершенствование сортиментной заготовки древесины // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 1(17). С. 128–135.

Derbin V.M., Derbin M.V. Improvement of Assortment Logging. *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry journal, 2015, vol. 5, no. 1(17), pp. 128–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/11270>

9. Запруднов В.И., Карпачев С.П., Быковский М.А. Технологии и технические средства процессов лесосечных работ // Лесн. вестн. 2017. Т. 21, № 1. С. 108–117.

Zaprudnov V.I., Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Technologies and Technical Means of Logging Processes. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no 1, pp. 108–117. (In Russ.).

10. Кацадзе В.А., Бирман А.Р., Свойкин Ф.В., Королько Н.С., Угрюмов С.А. Модернизация канатных трелевочных установок при разработке труднодоступных лесосек // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 6. С. 8–11.

Katsadze V.A., Birman A.R., Svoikin F.V., Korolko N.S., Ugryumov S.A. Modernization of Rope Skidding Installations in the Development of Inaccessible Logging Areas. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya = Repairs. Recovery. Modernization*. 2019, no. 6, pp. 8–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-6-8-11>

11. Кокорин И.И., Джиоев А.З. Некоторые возможные области применения подвесных канатных дорог в интересах МТО ВС РФ // Науч. проблемы материально-технич. обеспечения Вооруж. Сил Рос. Федерации. 2019. № 2(12). С. 174–184.

Kokorin I.I., Dzhioyev A.Z. Some Possible Areas of Application of Aerial Ropeways in the Interests of the Logistical Support of the Armed Forces of the Russian Federation. *Nauchnyye problemy material'no-tekhnicheskogo obespecheniya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii = Scientific problems of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation*. Saint-Petersburg, 2019, no. 2(12), pp. 174–184. (In Russ.).

12. Король С.А., Нехорошев Н.В. Применение канатных установок на трелевке лесоматериалов в горных районах и на грунтах с низкой несущей способностью // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-2(8-2). С. 95–98.

Korol S.A., Nekhoroshev N.V. The Use of Rope Systems for Skidding Timber in Mountainous Areas and on Soils with Low Bearing Capacity. *Aktualnyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual directions of scientific research in the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 3-2(8-2), pp. 95–98. (In Russ.).

13. Патент РФ 113917 U1, МПК А01G 23/00 (2006.01) В61В 7/00 (2006.01). Канатно-рельсовая трелевочная установка: № 2011147547/13: заявл. 24.11.2011; опубл. 10.03.2012 / И.В. Григорьев, Ф.В. Свойкин, А.И. Никифорова, О.И. Григорьева, А.М. Хахина.

Grigoryev I.V., Svoikin F.V., Nikiforova A.I., Grigoryeva O.I., Khakhina A.M. *Kanatno-rel'sovaya trelevochnaya ustanovka* [Rope-rail installation for skidding timber]. Patent RF, no. RU 113917, 2012. (In Russ.).

14. Патент РФ 173954 U1, МПК А01G 23/00 (2006.01). Устройство для сбора древесины канатно-рельсовой трелевочной установки: № 2016124147: заявл. 17.06.2016; опубл. 21.09.2017 / В.М. Дербин, М.В. Дербин, И.В. Григорьев, О.И. Григорьева, Ф.В. Свойкин.

Derbin V.M., Derbin M.V., Grigor'yev I.V., Grigor'yeva O.I., Svoikin F.V. *Ustroystvo dlya sbora drevesiny kanatno-rel'sovoy trelevochnoy ustanovkoj* [A device for collecting wood of rope-rail skidding installation]. Patent RF, no. RU 173954, 2017. (In Russ.).

15. Свойкин Ф.В., Соколова В.А., Локиштанов Б.М. К вопросу о перспективном направлении развития и анализа разработки труднодоступных переувлажненных лесосек с помощью канатных трелевочных установок в СЗФО РФ // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 2(46). С. 87–93.

Svoikin F.V., Sokolova V.A., Lokshtanov B.M. On the Issue of Perspective Direction of Development and Analysis of Development of Hard-to-reach Overwatered Forest Areas with the Help of Rope Skidders in the Northwestern Federal District of the Russian Federation. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2020, iss. 2(46), pp. 87–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-2-87-93>

16. Федоров С.В., Афанасьев Д.В. Теория ременных передач с учетом уравнения энергетического баланса трения // Изв. СамНЦ РАН. 2011. Т. 13, № 4(3). С. 892–895.

Fedorov S.V., Afanasyev D.V. Theory of Belt Transmissions Considering the Friction Energy Balance Equation. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk* = Mechanics and mechanical engineering. Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Bulletin, 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 892–895. (In Russ.).

17. Шошин А.О., Протас П.А., Мохов С.П., Гречко В.В. Исследование процесса трелевки хлыстов на заболоченных лесосеках канатными установками в зимний период // Лесозаготов. производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. А.С. Федоренчика, Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 72–76.

Shoshin A.O., Protas P.A., Mokhov S.P., Grechko V.V. Investigation of the Process of Skidding Logs on Swampy Logging Areas with Rope installations in Winter. *Materialy 1-oy Mezhdunarodnoy Nauchno-tekhnicheskoy Konferentsii "Lesozagotovitel'noye Proizvodstvo: Problemy i Resheniya"* = Materials of the 1st International Scientific and Technical Conference "Logging Production: Problems and Solutions". Minsk, BSFU Publ., 2017. pp. 72–76. (In Russ.).

18. Эттевей С. Механика трения и спасательные работы в альпинизме: докл. на междунар. спасат. симп. 1999 г. Режим доступа: https://angara.net/upload/33/51/f_1383351.pdf (дата обращения: 05.09.23).

Attaway S.W. Friction Mechanics and Rescue in Mountaineering. *Mezhdunarodnyy simpozium tekhnicheskikh spasateley* = International Technical Rescue Symposium (ITRS 99), 1999. pp. 22. (In Russ.).

19. Ackerman P., Pulkki R., Gleasure E. Modelling of Wander Ratios, Travel Speeds and Productivity of Cable and Grapple Skidders in Softwood Sawtimber Operations in South Africa. *Southern Forests*, 2014, vol. 76, iss. 2, pp. 101–110. <https://doi.org/10.2989/20702620.2014.917355>

20. Erber G., Spinelli R. Timber Extraction by Cable Yarding on Flat and Wet Terrain: a Survey of Cable Yarder Manufacturer's Experience. *Silva Fennica*, 2020, vol. 54, no. 2. <https://doi.org/10.14214/sf.10211>

21. Kellogg L.D. Planning and Operational Considerations for High Quality Forestry for Sleep Ground. *Special Thinning and Harvesting Planning for Skyline Operations Workshop*. Oregon State University, College of Forestry, Corvallis, Oregon, 1997. 33 p.

22. Munteanu C., Iordache E., Borz S.A., Ignea G., Yoshida M. Performance and Cost of Downhill Cable Yarding Operations in a Group Shelterwood System. *Journal of Forest Research*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 125–130. <https://doi.org/10.1080/13416979.2019.1603577>

23. Spinelli R., Magagnotti N., Visser R., Thees O., Sauter U.H., Krajnc N., Riond C. Cable Logging Contract Rates in the Alps the Effect of Regional Variability and Technical Constraints. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 195–203.

24. Svoynkin F.V., Sokolova V.A., Korolko N.S., Shoshin A.O. Constructive Solutions to Improve Cable Haulers for Development of Hard-to-reach Cutting Areas. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 193, no. 01048. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019301048> (accessed 05.09.23).

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*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-126-134

Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом

Е.Г. Хитров¹, д-р техн. наук; ResearcherID: R-8199-2016,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

И.С. Должиков², канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

А.С. Дмитриев³, инж.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>

В.А. Каляшов², канд. техн. наук; ResearcherID: ABA-9692-2021,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

И.В. Григорьев⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: S-7085-2016,

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

О.И. Григорьева⁵, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: AAC-9570-2020,

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

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; yegorkhitrov@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; idolzhikov222@mail.ru, vit832@yandex.ru

³АО «Гипростроймост – Санкт-Петербург», ул. Яблочкова, д. 7, Санкт-Петербург, Россия, 197198; dmitriev.nauka@mail.ru

⁴Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru

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

Поступила в редакцию 13.06.22 / Одобрена после рецензирования 10.09.22 / Принята к печати 14.09.22

Аннотация. Вопросы эксплуатационной и экологической эффективности колесных и гусеничных лесных машин рассматриваются в рамках направления, а ранее отдельной научной специальности, «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» достаточно давно. Данное направление взяло начало из трудов специалистов в области механизации сельского хозяйства, детально изучавших взаимосвязи в системе «двигатель–почва–урожай». И в сельскохозяйственном, и в лесозаготовительном производствах при рассмотрении взаимодействия движителей лесных машин с поверхностью движения широко использовались и используются методы механики грунтов. Однако лесные почвогрунты являются значительно более сложной для теоретического и экспериментального изучения средой, поскольку имеют ярко выраженную слоистую структуру, включающую органические и неорганические составляющие, и к тому же пронизаны корневой системой древесно-кустарниковой растительности. В настоящее время в лесозаготовительном производстве и лесном хозяйстве доминируют колесные лесные машины различного класса тяги, что связано с их универсальностью, большими эксплуатационными скоростями, возможностью перемещения между лесосеками своим ходом, включая перемещение по дорогам общего пользования. Несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, выполненных отече-

ственными и зарубежными учеными в области взаимодействия движителей колесных машин с лесными почвогрунтами, до настоящего времени остались слабо проработаны вопросы взаимосвязи шага грунтозацепов и сцепления движителя с почвогрунтом. Это связано в первую очередь с тем, что оценка проходимости машины по сцеплению дается после анализа показателей колееобразования и сопротивления движению. Данная статья направлена на теоретическое решение этого вопроса, развитие подхода к теоретической оценке коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом.

Ключевые слова: почвогрунты, лесные машины, колееобразование, уплотнение, колесные движители, коэффициент сцепления

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Хитров Е.Г., Должиков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 126–134. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

Original article

Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil

*Egor G. Khitrov*¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

*Ilya S. Dolzhikov*², Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Alexander S. Dmitriev*³, Engineer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>

*Vitaly A. Kalyashov*², Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

*Igor V. Grigorev*⁴✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

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

*Olga I. Grigoreva*⁵, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

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

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya str., 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; yegorkhitrov@gmail.com

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; idolzhikov222@mail.ru, vit832@yandex.ru

³Giprostroy-most-Saint Petersburg JSC, Yablochkova str., 7, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; dmitriev.nauka@mail.ru

⁴Arctic State Agrotechnological University, 3rd km, 3, sh. Sergelyakhskoye, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru✉

⁵St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutsky per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

Received on June 13, 2022 / Approved after reviewing on September 10, 2022 / Accepted on September 14, 2022

Abstract. The issues of operational and ecological efficiency of wheeled and tracked forest machines have been addressed within the framework of the direction, and previously a separate scientific specialty “Technology and machines of logging and forestry” for a long time now. This direction originated from the works of specialists in the field of agricultural mechanization, who studied the interrelationships in the “mover-soil-harvest” system in detail. Both in agricultural and logging production, when considering the interaction of forest machine movers with the driving surface, the methods of soil mechanics were and are widely used. However, forest soils are a much more complicated environment for theoretical and experimental study, as they have a pronounced layered structure, including organic and inorganic components, and, moreover, are penetrated by the root system of woody and shrubby vegetation. At present, wheeled forest machines of various traction classes dominate in logging production and forestry, which is due to their versatility, high operating speeds, the ability to move between harvesting areas on their own, including moving on public roads. Despite the considerable amount of theoretical and experimental research carried out by domestic and foreign scientists in the field of interaction of wheeled machines with forest soils, the issues of interrelation between the pitch of the ground hooks and the coupling of the mover with the soil have remained poorly worked out so far. This is due, first of all, to the fact that the evaluation of the machine’s passability by traction is given after evaluating the indicators of rutting and resistance to movement. This article is aimed at the theoretical solution of this issue, at the development of the approach to the theoretical assessment of the coefficient of adhesion of the wheeled mover of a forest machine with a soil.

Keywords: soils, forest machines, tracking, compaction, wheeled movers, coefficient of adhesion

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative developments in the field of logging industry and forestry” of the Arctic State Agrotechnological University. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 126–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

Введение

Экологическая и экономическая эффективность лесозаготовительного производства, а также большей части лесохозяйственных работ, на которых задействуются лесные машины, во многом зависит от экологической и эксплуатационной эффективности работы применяемых лесных машин [2, 9, 10, 15, 20, 21]. При этом работа лесных машин определяется соответствием параметров их конструкции природно-производственным условиям эксплуатации [6–8, 16, 17], которые даже на одних и тех же участках лесного фонда могут варьировать в очень широком диапазоне [3–5, 14, 18, 19].

Методы механики грунтов [1] нашли широкое применение в решении задач лесоинженерного дела [11]. Были разработаны и апробированы математические модели, предназначенные для расчета тягово-цепных свойств колесных и гусеничных машин, показателей колеобразования и уплотнения лесных грунтов. Учтены различные параметры движителей, относящиеся к их геометрии, нагрузке, времени воздействия на лесной грунт. Однако до настоящего времени слабо проработаны вопросы связи шага грунтозацепов на сцепление движителя

с грунтом. Это обусловлено в первую очередь тем, что оценка проходимости машины по сцеплению дается после оценки показателей колееобразования и сопротивления движению. Таким образом, для изучения отмеченных вопросов нужны верифицированные научные сведения, полученные сравнительно недавно. Кроме того, следует отметить сложность оценки сцепления, связанную с реализацией математических моделей и объемом вычислений [11, 12].

Статья направлена на развитие подхода к теоретической оценке коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом.

Объекты и методы исследования

Теоретическую основу исследования составляют положения механики грунтов [1]. Форма пятна контакта эластичного движителя с деформируемым грунтом принята прямоугольной с постоянной шириной и переменной длиной, определяемой с помощью модели [12], прогнозирующей глубину колеи с учетом свойств грунта и движителя. Свойства почвогрунта задаются в зависимости от категории прочности по [13]. Все вычисления реализованы в системе компьютерной математики Maple 2017.

Результаты исследования и их обсуждение

Сила сцепления F_t определяется интегрированием функции сопротивления сдвигу по площади пятна контакта. Если принять, что ширина пятна контакта постоянна, то задача упростится [1, 11]:

$$F_t = b \int_0^l \tau(x) dx, \quad (1)$$

где b – ширина пятна контакта, условно равная ширине колеса или гусеницы; l – длина пятна контакта; $\tau(x)$ – функция сопротивления сдвигу вдоль пятна контакта; x – координата, отсчитываемая вдоль пятна контакта.

Для определения функции сопротивления сдвигу $\tau(x)$ рассмотрим связь напряжения сдвига τ и деформации j . Выражение деформации сдвига составим как произведение линейной части j_0 и множителя ζ , учитывающего нелинейность при развивающемся срезе грунта [1]:

$$j = j_0 \zeta, \quad (2)$$

причем [1]

$$j_0 = \frac{\tau}{G} t; \quad \zeta = \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau}, \quad (3)$$

где G – модуль сдвига; t – шаг грунтозацепов; τ_m – параметр, характеризующий прочность грунта при сдвиге.

Коэффициент ζ в формуле (2) можно рассматривать как своего рода аналог коэффициента учета потери несущей способности в модели для расчета глубины колеи.

Тогда, решив уравнение (2) с учетом (3) относительно τ , запишем:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_m} + \frac{t}{Gj}}.$$

Характеристику прочности грунта при сдвиге введем с учетом его ослабления при развивающемся срезе [1]:

$$\tau_m = p \operatorname{tg} \varphi + C \xi, \quad (4)$$

где p – среднее давление по пятну контакта; φ – угол внутреннего трения; C – удельное сцепление грунта; ξ – коэффициент, учитывающий снижение прочности грунта при срезе.

Коэффициент ξ введем следующим образом:

$$\xi = \left\{ \left(1 - \frac{j - j_m}{t} \right) \operatorname{He} (j_m - j) \right\} \operatorname{He} \left\{ \left(1 - \frac{j - j_m}{t} \right) \operatorname{He} (j_m - j) \right\}, \quad (5)$$

где j_m – деформация сдвига, соответствующая срезу грунта [19],

$$j_m = t \frac{\tau_{\max}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (6)$$

τ_{\max} – прочность грунта на срез [1],

$$\tau_{\max} = p \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (7)$$

Физический смысл (4)–(7) следующий: по мере развития деформации j сопротивление сдвигу τ , связанное с удельным сцеплением грунта C , снижается, причем пропорционально j , в определенный момент слой грунта оказывается срезан и далее сопротивление τ обусловлено только его фрикционными свойствами φ . Результаты расчетов при $j = 0,14$ м, $p \approx p_s$ (p_s – несущая способность) на примере лесного почвогрунта со свойствами, указанными в таблице, приведены на рис. 1.

Свойства лесного почвогрунта, использованные при расчете коэффициента сцепления [12, 13]

Properties of forest soil used in the calculation of the adhesion coefficient [12, 13]

Параметр	Лесной почвогрунт		
	слабонесущий (III категория)	средней прочности (II категория)	прочный (I категория)
G , МПа	2,193	2,439	2,771
C , МПа	0,0053	0,0108	0,0252
φ , ...°	11,57	13,67	16,69

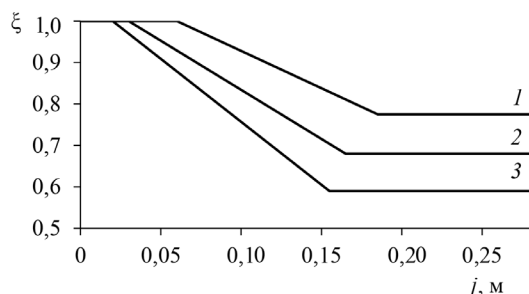


Рис. 1. Снижение сцепления лесного почвогрунта при развивающемся срезе (1 – III категория; 2 – II категория; 3 – I категория)

Fig. 1. The decrease in the adhesion of forest soil with a developing cut (1 – category I, 2 – category II, 3 – category III)

Деформация сдвига принимается по формуле [1]

$$j = Sx, \quad (8)$$

где S – коэффициент буксования движителя.

После подстановки (4)–(8) в формулу (3) получим функцию $\tau = \tau(x)$. Помимо параметров грунта C , φ , G , пятна контакта b , l , p , в (3) используется S , t .

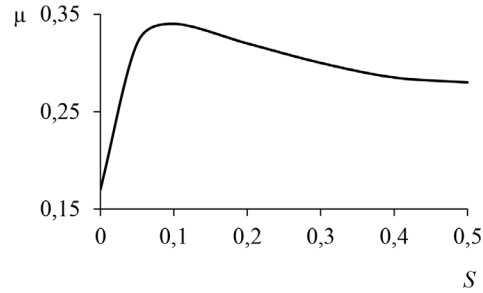
На рис. 2 показан пример результатов расчета, иллюстрирующий связь S и коэффициента сцепления [1]

$$\mu_t = \frac{F_t}{G_w},$$

где G_w – вес машины, отнесенный к единичному движителю.

Рис. 2. Связь коэффициента буксования и коэффициента сцепления (лесной почвогрунт II категории)

Fig. 2. Correlation between slipping coefficient and adhesion coefficient (II category forest soil)



Расчет выполнен для II категории лесного почвогрунта при $b = 0,7$ м, $G_w = 0,035$ МН, $t = 0,14$ м, $l = 0,648$ м (длина пятна контакта по модели при $d = 1,333$ м, давлении в шине $p_w = 0,35$ МПа).

Важно отметить, что на практике прямо управлять значением S невозможно; буксование возникнет в соответствии со сдвигом почвогрунта и определится из условия

$$F_t = F_R, \quad (9)$$

где F_R – сила сопротивления движению машины, отнесенная к единичному движителю,

$$F_R = b \int_0^h p(h) dh, \quad (10)$$

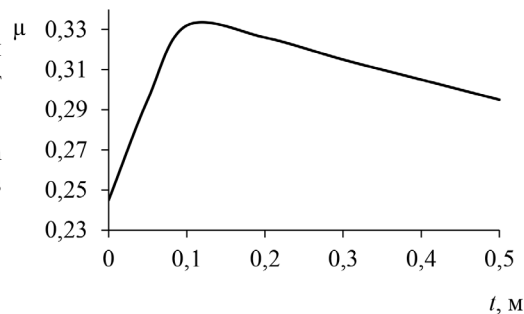
h – глубина колеи.

Таким образом, для оценки возникающего буксования движителя нужно решить уравнение (9) с учетом (1), (10) относительно S . Задача решается численно, при этом F_R определяется с помощью модели для расчета глубины колеи h и длины пятна контакта l при заданных b , p_w , G_w и параметрах грунта по [11]. Решение задачи представляет собой масштабный вычислительный эксперимент и, вероятно, составляет перспективное направление дальнейших исследований.

Однако известны рекомендации принимать в практических расчетах S равным 0,1 [11]. Тогда связь коэффициента сцепления μ , и шага грунтозацепов t , согласно проведенным расчетам, имеет вид графика, показанного на рис. 3.

Рис. 3. Связь коэффициента сцепления и шага грунтозацепов (лесной почвогрунт II категории)

Fig. 3. Correlation between adhesion coefficient and the pitch of ground hooks (II category forest soil)



Заключение

Полученный результат показывает, что при коэффициенте буксования движителя 0,1 максимальному значению коэффициента сцепления соответствует шаг грунтозацепов, примерно равный 0,14 м. Это хорошо согласуется с практическим опытом производителей шин для лесной техники и свидетельствует об адекватности предложенной модели в рассмотренном случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с. Ageikin Ya.S. *Passability of Cars*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 232 p. (In Russ.).
2. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Куницкая О.А. Моделирование взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления со слабонесущей опорной поверхностью // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4(44). С. 95–101. Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Kunitskaya O.A. Modeling of Interaction of an Ultra-low Pressure Wheeled Mover with a Weakly Bearing Support Surface. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 4(44), pp. 95–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-4-95-101>
3. Васильев А.И., Добрецов Р.Ю. Современные методы проведения испытаний с помощью комплексов для интерактивного моделирования // Транспортные системы: междунар. науч. онлайн-конф., 28 окт. 2021 г. / СПбПУ Петра Великого. СПб.: Политех-Пресс, 2021. С. 39–43. Vasiliev A.I., Dobretsov R.Yu. Modern Methods of Testing Using Complexes for Interactive Modeling. *Transport systems. International Online Scientific Conference*. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Politeh-Press Publ., 2021, pp. 39–43. (In Russ.).
4. Добрецов Р.Ю., Костромин М.В., Костромин Н.М. Принципы получения характеристик грунта и траектории движения для гусеничного шасси в рамках концепции автоматизации подвижности // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XXIV Всерос. науч.-практ. конф., 31 марта – 3 апр. 2021 г. РАРАН: в 7 т. Т. 1. СПб.: НПО Спецматериалов, 2021. С. 368–375. Dobretsov R.Yu., Kostromin M.V., Kostromin N.M. Principles of Obtaining Soil Characteristics and Movement Trajectories for a Tracked Chassis within the framework of the Mobility Automation Concept. *Current protection and security issues*. Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference RARAN. In 7 volumes. St. Petersburg, RPA Spetsmaterialov Publ., 2021, pp. 368–375. (In Russ.).
5. Костромин Н.М., Добрецов Р.Ю., Костромин М.В. Методика оценки основных параметров грунта при использовании шасси-анализатора // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: материалы V Всерос. науч.-практ. конф., Ижевск, 29–30 апр. 2021 г. / под ред. Н.М. Филькина. Ижевск: УИР ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2021. С. 203–208. Kostromin N.M., Dobretsov R.Yu., Kostromin M.V. Methodology for Estimation of Basic Soil Parameters Using a Chassis Analyzer. *Automotive engineering: design, construction, calculation and repair and production technologies*. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. Izhevsk, 2021, pp. 203–208. (In Russ.).
6. Костромин Н.М., Костромин М.В., Добрецов Р.Ю. Обоснование создания колесного шасси-анализатора для получения характеристик грунта взлетно-посадочных полос и дорог общего пользования // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XXV Всерос. науч.-практ. конф., 4–7 апр. 2022 г.: в 6 т. Т. 1. СПб.: НПО Спецматериалов, 2022. С. 396–400.

Kostromin N.M., Kostromin M.V., Dobretsov R.Yu. Justification for the Creation of a Wheeled Chassis Analyzer for Obtaining Characteristics of Soil of Runways and Public Roads. *Current protection and security issues*. Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg, RPA Spetsmaterialov Publ., 2022, pp. 396–400. (In Russ.).

7. Кузнецов Д.А., Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю. Адаптация вально-планетарной трансмиссии к использованию на колесном тракторе семейства «Кировец» // Транспортные системы: сб. материалов Междунар. науч. онлайн-конф. для молодых ученых и аспирантов, 29 нояб. 2022 г. СПб.: Политех-Пресс, 2023. С. 11–16.

Kuznetsov D.A., Demidov N.N., Dobretsov R.Yu. Adaptation of the Shaft-Planetary Transmission for Use on the Kirovets Wheeled Tractor Family. *Transport systems. Collection of materials of the International Scientific Online Conference for young scientists and postgraduates*. Saint Petersburg, 2023, pp. 11–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/SPB-PU/2/id23-3>

8. Кузнецов Д.А., Добрецов Р.Ю. Вально-планетарный трансформирующий механизм для лесных и транспортных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: ПетрГУ, 2022. С. 92–94.

Kuznetsov D.A., Dobretsov R.Yu. Shaft-planetary Transformer for Forestry and Transport Machines. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2022, pp. 92–94. (In Russ.).

9. Куницкая О.А., Макуев В.А., Стародубцева Т.Н., Калита Г.А., Ревяко С.И., Тимохов Р.С. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4(56). С. 57–63.

Kunitskaya O.A., Makuev V.A., Starodubtseva T.N., Kalita G.A., Revyako S.I., Timokhov R.S. Problems of Improving the Quality of Domestic Forestry Engineering. *The system. Methods. Technologies*, 2022, no. 4(56), pp. 57–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-4-57-63>

10. Скубак А.С., Синов А.Д., Макаров А.А., Анохин Р.А., Виноградова Е.А., Суворов С.А., Шапиро В.Я. Автоматизация расчетов глубины колеи при воздействии форвадера на оттаивающий почвогрунт // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2022. Вып. 62. С. 280–283.

Skubak A.S., Sinov A.D., Makarov A.A., Anokhin R.A., Vinogradova E.A., Suvorov S.A., Shapiro V.Ya. Automation of Track Depth Calculations under the Influence of Forwarder on Thawing Soil. *Current problems of the forest complex*, 2022, iss. 62, pp. 280–283. (In Russ.).

11. Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В. Математические модели взаимодействия движителей машин с грунтами // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 4. С. 15–64.

Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigorev G.V. Mathematical Models of Interaction of Propellers of Machines with Soils. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 15–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2020.5422>

12. Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В. Комплексная оценка взаимодействия движителей машин с лесными грунтами на базе методов теории движения транспорта в условиях бездорожья // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 1–52.

Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigorev G.V. A Comprehensive Assessment of Indicators of Interaction of Machine Movers with Forest Soils on the Basis of Methods of the Theory of Traffic in Off-road Conditions. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 1–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5442>

13. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Тарадин Г.С., Божбов В.Е. Теоретический расчет несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам // Изв. СПбЛТА. 2019. Вып. 226. С. 111–123.

Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Taradin G.S., Bozhbov V.E. Theoretical Calculation of the Bearing Capacity of Cohesive Soil by Cone Index and Mechanical Properties. *St. Petersburg Forestry Academy Bulletin*, 2019, iss. 226, pp. 111–123. (In Russ.).

14. Шапиро В.Я. Инвариантность принципов механики контактного разрушения при математическом моделировании процессов лесопромышленного комплекса // Наукосфера. 2022. № 2(1). С. 121–124.

Shapiro V.Ya. Invariance of Contact Fracture Mechanics Principles in Mathematical Modeling of Timber Industry Processes. *Naukosfera = Sciencesphere*, 2022, no. 2(1), pp. 121–124. (In Russ.).

15. Шапиро В.Я. Влияние анизотропии свойств оттаивающего почвогрунта на устойчивость трелевочного волока на склоне // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 63. С. 339–342.

Shapiro V.Ya. Influence of Anisotropy of Thawing Soil Properties on the Stability of a Skidder on a Slope. *Current problems of the forest complex*, 2023, no. 63, pp. 339–342. (In Russ.).

16. Шэнь Ю., Москаленко М.Б., Добрецов Р.Ю. Принципы построения шасси экстремальной проходимости для эксплуатации в лесном комплексе // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: ПетрГУ, 2022. С. 208–209.

Shen Yu., Moskalenko M.B., Dobretsov R.Yu. Principles of Construction of Extreme Terrain Chassis for Operation in the Forest Complex. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2022, pp. 208–209. (In Russ.).

17. Dobretsov R.Y., Lozin A.V., Kaninskii A.O., Rolle V.E. Steering Mechanisms with Alterable Kinematic Parameter. *Mechanisms and Machine Science (book series)*, 2022, vol. 108, pp. 512–521. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87383-7_55

18. Dobretsov R.Y., Porshnev G.P., Semenov A.G., Bulakh D.V., Bondar K.A. The Estimation of Main Parameters of the Power Plant and Electromechanical Powertrain for the Wheeled Vehicle. *International Review of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 139–145. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i2.18262>


19. Dobretsov R.Yu., Dobretsova S.B., Troyanovskaya I.P., Tikhonov E.A., Nuretdinov D.I. The Method of Expert Assessments as Applied to the Ranking of Technical Solutions in the Design of a Tractor Gearbox. *Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Krasnoyarsk, 2021. <https://doi.org/10.3233/AJW210033>

20. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure Control Systems for Tire Preservation in Forestry Machinery and Forest Soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 95–102. <https://doi.org/10.3233/AJW210033>

21. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the Efficiency of Forest Companies by Optimizing the Key Indicators of Sustainable Forest Management: a Case Study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 190–200. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

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 674.038.1:620.179.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-135-150

Оценка точности метода измерения сопротивления сверлению древесины в дендрохронологических исследованиях


В.Ю. Чернов , канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

Е.С. Шарапов, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>


И.Г. Гайсин, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,
г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; chernovvy@volgatech.net , SharapovES@volgatech.net,
GaisinIG@volgatech.net

Поступила в редакцию 05.09.22 / Одобрена после рецензирования 03.12.22 / Принята к печати 08.12.22

Аннотация. Одним из перспективных методов определения физико-механических свойств и строения древесины является метод, основанный на измерении сопротивления сверлению. Ограничения применения данного метода в дендрохронологических исследованиях связаны с рядом факторов, оказывающих значимое влияние на точность установления вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев: глубиной сверления, его направлением относительно волокон, скоростными параметрами процесса сверления. В целях оценки точности измерения радиального прироста древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) влажностью 6–8 % были использованы устройство ResistYX и стандартные тонкие буровые сверла. На основании сравнительного анализа радиальных приростов древесины, определенных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению, для получения точных данных о приросте с коэффициентом корреляции больше 0,7 рекомендовано измерять на одном образце не более 17 годичных слоев, что соответствует средней суммарной ширине годичных слоев 36,6 мм. Изучено влияние основных причин снижения точности определения радиального прироста методом измерения сопротивления сверлению: геометрических параметров режущей части тонкого бурового сверла, отклонения направления сверления от заданного, невозможности точного определения строго радиального направления сверления, пороков древесины, а также трения хвостовика сверла при повышении глубины просверливания. Для увеличения точности метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологических исследованиях предлагается: разработать методику, в том числе с применением специального или вновь разработанного инструмента, для более точного определения сердцевины и радиального просверливания дерева или круглого лесоматериала; повысить жесткость тонкого бурового сверла; обеспечить требуемую фиксацию тонкого бурового сверла в процессе его первоначального контакта с древесиной и внутри устройства.

© Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Гайсин И.Г., 2023

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

Дальнейшие исследования в обозначенном направлении будут связаны с оценкой точности определения радиального прироста хвойных пород древесины по усилию подачи тонкого бурового сверла.

Ключевые слова: годовые слои древесины, дендрохронологические исследования, профиль сопротивления сверлению, оптический метод, тонкое буровое сверло, точность измерения, метод измерения сопротивления сверлению, ResistYX

Благодарности: Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-674/3) и за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

Для цитирования: Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Гайсин И.Г. Оценка точности метода измерения сопротивления сверлению древесины в дендрохронологических исследованиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 135–150. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-135-150>

Original article

Evaluation of the Accuracy of Wood Drilling Resistance Measurement Method in Dendrochronological Studies

Vasilii Yu. Chernov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

Evgenii S. Sharapov, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

Ilschat G. Gaisin, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; chernovvy@volgatech.net[✉], SharapovES@volgatech.net, GaisinIG@volgatech.net

Received on September 5, 2022 / Approved after reviewing on December 3, 2022 / Accepted on December 8, 2022

Abstract. One of the promising methods for determining physical and mechanical properties and structure of wood is the method based on the measurement of drilling resistance. Limitations of application of the method of measuring drilling resistance in dendrochronological studies are related to a number of factors that have a significant impact on the accuracy of determining the variation of physical and mechanical properties of wood within annual layers: the depth of drilling, its direction relative to the fibers, and the speed parameters of the drilling process. In order to assess the accuracy of measuring the radial growth of pine wood (*Pinus sylvestris* L.) with moisture content of 6–8 %, the ResistYX device and standard thin drill bits were used. On the basis of comparative analysis of radial wood growth determined by the optical method and the method of measuring resistance to drilling, it was found that in order to obtain accurate data on growth with a correlation coefficient greater than 0.7, it is recommended to measure no more than 17 annual layers on one sample, which corresponds to an average total width of annual layers of 36.6 mm. The influence of the main reasons for the decrease in the accuracy of radial growth determination by the drilling resistance measurement method was studied: geometrical parameters of the cutting part of a thin drill bit, deviation of the



drilling direction from the specified one, impossibility of precise determination of the strictly radial drilling direction, wood flaws, as well as friction of the drill shank when the drilling depth increases. To increase the accuracy of the method of measuring drilling resistance in dendrochronological studies it is proposed to develop a method including the use of a special or newly developed tool for more accurate determination of the core and radial drilling of wood or round timber; to increase the rigidity of the thin drill bit; to provide the required fixation of the thin drill bit during its initial contact with wood and inside the device. Further studies in this direction will be associated with the assessment of measuring accuracy for the radial growth of coniferous wood by the feeding force for drill bit penetration.

Keywords: annual layers of wood, dendrochronological studies, drilling resistance profile, optical method, thin drill bit, measurement accuracy, drilling resistance measurement method, ResistYX

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant № 075-15-2021-674/3) and Core Facility Centre «Ecology, biotechnologies and processes for obtaining environmentally friendly energy carriers» of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola and by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

For citation: Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Gaisin I.G. Evaluation of the Accuracy of Wood Drilling Resistance Measurement Method in Dendrochronological Studies. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 135–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-135-150>

Введение

Дендрохронологические исследования направлены на изучение изменчивости годичного прироста древесины в целях датировки природных явлений, исторической и археологической древесины, реконструкции климатических и гидрологических условий, изучения динамики лесных экосистем и солнечной активности. Объектом дендрохронологических исследований могут являться различные характеристики годичного радиального прироста древесины: ширина годичного слоя, вариация физико-механических или химических свойств древесины в пределах годичного слоя, площадь годичного кольца [2, 7, 11, 14].

Для дендрохронологического анализа чаще всего используются бруски или круговые поперечные спилы древесины, керны, а также клиновидные выпилы и высечки, взятые, например, с растущих деревьев или элементов деревянных конструкций [7, 11, 14]. Выбор способа получения образцов будет зависеть от ряда факторов, связанных в первую очередь с допустимостью полного или частичного разрушения изучаемого объекта, транспортировки и подготовки образцов для измерения параметров радиального прироста древесины. Как отмечается исследователями [14], круговые поперечные спилы позволяют повысить точность измерений радиального прироста на основании возможного учета нарушений в формировании годичных слоев – выпавших и ложных годичных слоев. Широкое распространение получили методики сбора образцов, основанные на использовании ручных или электрических приростных буравов [1, 3, 23] и позволяющие снизить разрушающее воздействие на объект исследования. Применение специальных современных измерительных комплексов и

программ дает возможность автоматизировать процесс измерений и последующего анализа данных радиального прироста древесины. Вместе с тем следует отметить, что отбор кернов из древесины, особенно пораженной гнилью, весьма затруднителен, а последующие этапы хранения, сушки и подготовки кернов для работы характеризуются высокой трудоемкостью.

Из числа современных подходов, применяемых в области дендрохронологии, может быть рассмотрен метод исследования физико-механических свойств древесины, основанный на измерении сопротивления древесины сверлению [9, 12, 18, 19, 24, 25, 29–31]. Метод заключается в просверливании древесины тонкими буровыми сверлами (диаметром 3 мм), оперативном определении энергосиловых и скоростных параметров процесса сверления, коррелирующих с плотностью, деформативностью, механическими и технологическими свойствами древесины [9, 12]. Благодаря использованию тонких буровых сверл, незначительно воздействующих на дерево, описанный метод относится к группе малоинвазивных, или квазинеразрушающих, методов контроля. Трудоемкость, уровень разрушающего воздействия, а также затраты времени на получение временного ряда данных значительно ниже по сравнению с методом, основанным на получении и последующем анализе кернов.

В работах [24, 25] представлены результаты оценки корреляции некоторых параметров годичных слоев пихты (*Abies alba*), лиственницы (*Larix decidua*), ели (*Picea abies*), сосны (*Pinus cembra*), липы (*Tilia platyphyllos*) и тополя (*Populus* sp.), полученных методами измерения сопротивления сверлению и рентгенографической денситометрии. Авторами отмечается, что геометрические параметры режущей части тонкого бурового сверла являются лимитирующим фактором при определении параметров годичных слоев шириной до 0,5 мм.

Результаты исследований, направленных на установление тесноты связи ширины годичных слоев и вариации плотности в пределах годичных слоев пихты, представлены в работе [15]. При анализе параметров, характеризующих годичные слои древесины, методами измерения сопротивления сверлению и рентгенографии наибольшая степень взаимосвязи установлена для корреляции средней общей ширины годичных слоев ($r = 0,8$). Точное определение параметров годичных слоев древесины возможно для профилей сопротивления сверлению лишь первых 6–8 годичных слоев, следующих после коры.

Выводы по применению метода измерения сопротивления сверлению для определения размерных характеристик радиального прироста древесины представлены также в работах [16, 22, 31, 32]. В [16] показана высокая сходимости вариации ширины годичных слоев древесины при определении ширины годичных слоев сосны (*Pinus brutia*) с помощью буровых кернов и метода измерения сопротивления сверлению. При этом значимое влияние на полученные данные оказывали отклонение от радиального направления просверливания, пороки древесины, содержание смол. Также существенно воздействуют на точность метода глубина просверливания и связанное с ней уменьшение радиуса кривизны годичных колец при приближении к сердцевине [24, 25]: в годичных слоях малого радиуса режущие кромки сверла в процессе резания одновременно взаимодействуют с ранней и поздней древесиной, усредняя сопротивление сверлению и сглаживая вариацию плотности (механических свойств) в годичном слое.

Сравнительный анализ радиального прироста деревьев (*Quercus robur*, *Ulmus procera* и *Platanus × acerifolia*), данные о котором получены с помощью метода измерения сопротивления сверлению и при использовании буровых кернов, представлен в работе [22]. Обнаружена высокая степень корреляции ширины годичных слоев древесины, также измеренной представленными методами ($R^2 = 0,78-0,95$). Однако установлена недостаточная точность определения годичных слоев древесины шириной до 1 мм, метод не рекомендуется для дендрохронологических исследований. Схожие результаты приведены в [15]. Сравнительный анализ методик дендрохронологического анализа исторической древесины деревянных конструкций с помощью буров и устройств для измерения сопротивления сверлению установил сложность определения радиального прироста по профилям сопротивления древесины сверлению без дополнительного отбора кернов.

Направление сверления относительно направления волокон древесины является одним из ключевых факторов, влияющих на разрешающую способность определения вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев при использовании метода измерения сопротивления сверлению [16, 17, 24–26]. Скорость подачи тонкого бурового сверла также является одним из значимых параметров, воздействующих на точность определения вариации физико-механических свойств древесины [13, 24, 25, 28]. Снижение точности определения плотности древесины (вариации плотности) в годичных слоях при повышении глубины сверления может быть связано и с повышением трения хвостовика тонкого бурового сверла [20, 21, 27]. Существенную роль при использовании метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологии играют конструктивные особенности и технические характеристики устройств, основанных на нем. Представленные выше исследования выполнялись с помощью устройств Resistograph (Rinntech, г. Хайдельберг, Германия) и IML-Resi (IML, г. Моултонборо, США).

На основании анализа перечисленных работ можно утверждать, что ограничения применения метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологических исследованиях связаны с рядом факторов, оказывающих значимое влияние на точность определения вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев: глубиной сверления, направлением сверления относительно волокон, скоростными параметрами процесса сверления. Вместе с тем, учитывая явные преимущества метода измерения сопротивления сверлению по скорости измерений и общим трудозатратам в сравнении с использованием приростных буров (кернов), разработка рекомендаций по допустимой глубине просверливания и наибольшему числу просверленных годичных слоев, обеспечивающих допустимую точность измерения характеристик годичного прироста, является актуальной задачей.

Данная работа направлена на исследование точности метода измерения сопротивления сверлению при определении прироста древесины авторской разработкой – устройством ResistYX [9], а также на разработку методологических и конструкторских решений, способствующих повышению точности измерения вариации физико-механических свойств древесины в пределах годичных слоев указанным методом.

Объекты и методы исследования

Образцы для исследований были изготовлены из элементов бревенчатой стены деревянной постройки, эксплуатируемой около 45 лет (рис. 1). Материал – сосна (*Pinus sylvestris* L.). После демонтажа сооружения взяты участки из различных частей бревен без видимых дефектов, из выбранных частей выпиливались чураки длиной 500 мм – 6 шт. Чураки раскраивались продольно с получением сердцевинной доски толщиной 50 мм (этап 1, рис. 1). Поскольку не представлялось возможным просверлить более широкие доски насквозь в радиальном направлении так, чтобы сверло вышло с противоположной кромки (сверло выходило на одну из пластей), доски шириной свыше 150 мм были поделены на 2 части примерно по сердцевине (этап 2, рис. 1). Полученные доски выдерживались в сухом, отапливаемом помещении до достижения равновесной влажности 6–8 %.

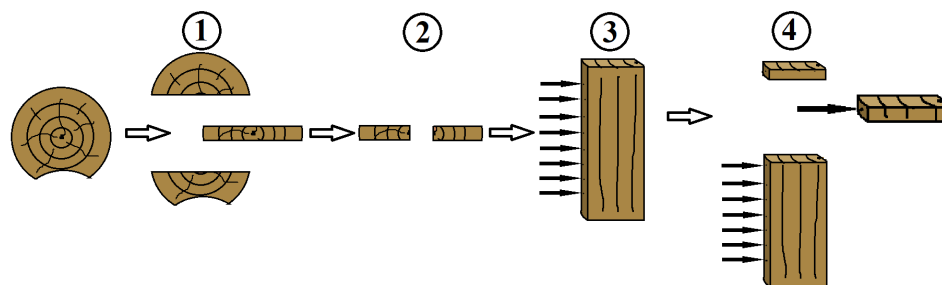


Рис. 1. Способ получения образцов из элементов бревенчатой стены деревянной конструкции: 1 – выпиливание центральной доски из чурака; 2 – деление сердцевинной доски по ширине на 2 части (для досок шириной свыше 150 мм); 3 – просверливание доски в радиальном направлении; 4 – получение образцов для измерения ширины годичных слоев

Fig. 1. Method for obtaining samples from log wall elements: 1 – cutting out the central board from a block; 2 – dividing the core board widthwise into 2 parts (for boards with width over 150 mm); 3 – drilling the board in radial direction; 4 – obtaining samples for measuring the width of annual layers

Каждая полученная сердцевинная доска просверливалась в радиальном направлении по длине с шагом 30 мм (этап 3, рис. 1). Для удобства определения радиального прироста и достижения более высокой сходимости результатов, полученных двумя методами, каждая из досок делилась поперечно в области сверления, как показано на рис. 1 (этап 4) и на рис. 2. Толщина полученных образцов составляла 6–8 мм. Исследуемая оптической методом поверхность образцов зашлифовывалась, на нее наносилась радиальная линия (рис. 2, справа), которая являлась номинальной траекторией сверления.

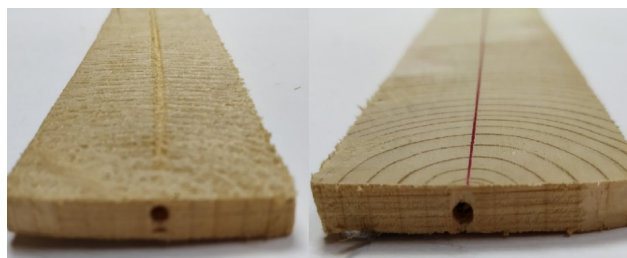


Рис. 2. Образцы древесины: с реальной (слева) и номинальной (справа) траекторией сверления

Fig. 2. Wood samples: with an actual drilling direction (left) and with a nominal drilling direction (right)

С помощью микроскопа МПБ-2 (Ижевский приборостроительный завод, УССР) с точностью 0,05 мм выполнялось измерение прироста годичных слоев древесины на каждом образце (рис. 2) по направлению сверления (подачи тонкого бурового сверла).

Измерение сопротивления сверлению осуществлялось с использованием устройства ResistYX [9, 10]. Устройство (рис. 3) имеет следующие основные технические характеристики: сопротивление сверлению древесины определяется по электрической мощности вращения и подачи тонкого бурового сверла; разрешающая способность при скорости подачи сверла 500 мм/мин не более 1/100 мм; абсолютная точность измерения плотности древесины (сосна) – $\pm 4 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, относительная – $\pm 1 \%$.

Рис. 3. Устройство для измерения сопротивления сверлению ResistYX

Fig. 3. Drilling resistance measuring device ResistYX



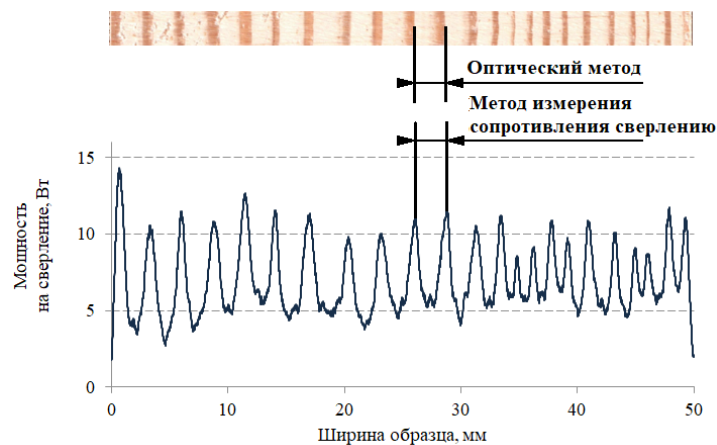
Сбор данных об электрической мощности сверления проводился с помощью разработанной программы для ЭВМ [8] в программной среде LabVIEW. Программа позволяет автоматизировать процесс исследования физико-механических свойств и внутреннего строения древесины на основе метода измерения сопротивления сверлению. Сведения о сопротивлении древесины сверлению выгружаются в файл Excel в виде динамических рядов данных.

Радиальный прирост древесины определялся по следующей методике (рис. 4): при использовании оптического измерительного прибора радиальный прирост находился как расстояние между переходными зонами ранней и поздней древесины соседних годичных слоев;

при использовании устройства для измерения сопротивления сверлению ResistYX – как расстояние между 2 соседними максимальными сопротивлениями сверлению, характеризующими участки поздней древесины соседних слоев с максимальной плотностью древесины.

Рис. 4. Торцевая поверхность образца древесины и профиль сопротивления сверлению

Fig. 4. End surface of the wood sample and drilling resistance profile



Ширина годичного слоя, измеренная с помощью оптического прибора, была принята в качестве действительного значения (независимая переменная), так как получена в результате прямых измерений, а ширина годичного слоя, определенная по профилю сопротивления древесины сверлению, – в качестве сопоставляемого значения (зависимая переменная).

Построение и обработка временных рядов данных осуществлялись по следующей методике:

1. Построение диаграмм прироста древесины в Excel по данным оптического метода и метода измерения сопротивления сверлению, их визуальный анализ. При этом на каждом образце были выявлены участки со схожей динамикой прироста.

2. Обработка массивов данных прироста древесины по всей ширине образца и по его отдельным наиболее схожим участкам методом кросс-корреляции в программе Statistica 10.

3. Обработка данных по ширине годичных слоев, полученных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению, статистическими методами, основанными на сглаживании данных [4]:

наименьших квадратов по М. Неслунду (OLS-H): $y = a + bx$ (y – расчетная ширина годичного слоя; a, b – коэффициенты тренда прироста годичных слоев; x – порядковый номер годичного слоя) – и по Б. Эклунду (OLS-Э): $1/y = -a + xb$;

простой скользящей средней с 3-, 5- и 11-летним сглаживанием (SMA-3, SMA-5, SMA-11 соответственно);

весовой 3-летней скользящей средней (метод Э. Шульмана). Метод относится к треугольной скользящей средней (ТМА), расчеты производятся по формуле

$$b_i = (c + 2d + e)/4,$$

где b_i – сглаженная ширина годичного слоя данного года; c, d, e – ширина годичного слоя предыдущего, данного и последующего годов соответственно.

4. Корреляционный анализ полученных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению (уровень доверительной вероятности $p = 0,05$) данных радиального прироста древесины по всей ширине образца и по его отдельным наиболее схожим участкам.

5. Определение обработанных статистическими методами в программе Statistica основных статистических параметров (среднее, минимальное, максимальное значения, среднеквадратическое отклонение) по данным с заметной ($r > 0,5$), высокой ($r > 0,7$) и очень высокой ($r > 0,9$) силой связи.

Результаты исследования и их обсуждение

Для повышения точности результатов сравнительного анализа временных рядов данных радиального прироста была выполнена кросс-корреляция, которая позволила наилучшим образом сопоставить данные по приросту, полученные обоими названными методами. Целью этой операции являлось исключение возможных ошибок, связанных со случайным нарушением последовательности учета годичных слоев при измерении прироста древесины оптическим методом.

Результаты обработки и корреляционного анализа данных, полученных методом сопротивления сверлению (без сглаживания и с 6 методами сглаживания) по отношению к фактическим данным – результату применения оптического метода – представлены в табл. 1 для всей ширины образца и для отдельных наиболее схожих участков.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции временных рядов данных радиального прироста, полученных оптическим методом и методом измерения сопротивления сверлению

Correlation coefficients of the radial growth time series data obtained by optical and drilling resistance measurement methods

№ образца	Без сглаживания	С использованием статистических методов сглаживания данных						Число годовичных слоев	Суммарная ширина годовичных слоев, мм
		OLS-H	OLS-Э	SMA-3	SMA-5	SMA-11	TMA		
<i>Весь образец</i>									
1.1.2	0,13	1,00	0,59	0,17	0,15	0,11	0,22	76	151,2
1.1.6	0,27	0,49	0,47	0,45	0,54	0,69	0,43	80	155,7
1.2.4	0,48	0,49	0,51	0,67	0,75	0,85	0,64	70	156,3
1.2.6	0,25	0,55	0,57	0,43	0,54	0,67	0,44	69	154,1
2.1.7	0,16	1,00	0,40	0,21	0,28	0,64	0,04	53	148,4
2.2.4	0,01	1,00	0,70	0,32	0,39	0,58	0,32	65	113,0
2.2.5	0,32	0,44	0,46	0,68	0,81	0,87	0,66	72	162,2
3.1	0,08	1,00	0,97	0,28	0,44	0,79	0,26	31	89,4
3.2	0,13	1,00	0,99	0,18	0,20	0,29	0,17	64	95,4
3.4	0,12	1,00	0,96	0,45	0,60	0,83	0,41	20	44,6
5.1.9	0,42	1,00	1,00	0,62	0,72	0,94	0,68	47	102,2
5.2.10	0,04	1,00	0,97	0,05	0,17	0,38	0,04	56	82,0
<i>Отдельные наиболее схожие участки образца</i>									
1.1.2 (1)	0,68	1	1,00	0,96	–	–	0,98	7	18,0
1.2.4 (1)	0,48	1	1,00	0,77	0,82	0,58	0,71	39	70,5
1.2.6 (1)	0,81	1	1,00	0,93	0,89	–	0,96	12	33,1
1.2.6 (2)	0,62	1	1,00	0,87	0,88	0,93	0,80	32	57,7
2.1.7 (2)	0,97	1	1,00	0,98	–	–	0,97	5	8,2
2.1.7 (3)	0,75	1	0,83	0,83	0,77	–	0,91	8	15,5
2.1.7 (1)	0,67	1	0,92	0,82	0,67	–	0,77	11	19,9
2.2.5 (1)	0,41	1	1,00	0,48	0,52	0,71	0,46	40	96,3
2.2.5 (2)	0,91	1	1,00	0,97	0,99	0,97	0,96	18	32,8
3.2 (1)	0,07	1	0,99	0,03	0,47	0,51	0,04	20	45,2
3.2 (2)	0,76	1	0,73	0,89	0,91	0,90	0,88	24	64,9
3.4 (1)	0,38	1	0,99	0,40	0,18	0,44	0,40	14	39,4
5.2.10 (1)	0,21	1	0,99	0,19	0,61	0,58	0,08	20	38,9
5.2.10 (2)	0,53	1	1,00	0,57	0,50	0,16	0,55	24	62,1
5.2.7 (1)	0,73	1	1,00	0,66	0,68	0,97	0,67	16	47,3
5.2.7 (2)	0,43	1	0,99	0,67	0,82	0,76	0,64	23	67,9
5.2.7 (3)	0,50	1	1,00	0,74	0,58	0,50	0,74	17	45,9

По некоторым отдельным схожим участкам образцов не представлены коэффициенты корреляции SMA для данных с 11-летним сглаживанием. Это связано с тем, что в большинстве из групп SMA количество попавших годовичных слоев было меньше 11.

На основе полученных результатов корреляционного анализа данных рассчитаны основные статистические показатели, характеризующие точность метода измерения сопротивления сверлению при определении радиального прироста древесины (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета в зависимости от статистического метода сглаживания данных и от коэффициента корреляции
The results of calculating the annual rings number depending on the statistical method of data smoothing and on the correlation coefficient

Метод сглаживания	Коэффициент корреляции r	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
<i>Количество годовичных слоев</i>					
SMA-3	> 0,5	27	5	72	21
	> 0,7	17	5	39	11
	> 0,9	11	5	18	6
SMA-5	> 0,5	34	8	80	23
	> 0,7	35	8	72	23
	> 0,9	21	18	24	4
SMA-11	> 0,5	40	16	80	22
	> 0,7	36	16	72	20
	> 0,9	27	16	47	13
TMA	> 0,5	27	5	72	21
	> 0,7	17	5	39	11
	> 0,9	10	5	18	5
<i>Суммарная ширина годовичных слоев</i>					
SMA-3	> 0,5	60,3	8,2	162,2	45,9
	> 0,7	36,6	8,2	70,5	22,1
	> 0,9	23,0	8,2	33,1	12,1
SMA-5	> 0,5	75,1	15,5	162,2	48,7
	> 0,7	76,3	15,5	162,2	50,0
	> 0,9	48,8	32,8	64,9	22,7
SMA-11	> 0,5	89,1	32,8	162,2	46,2
	> 0,7	83,8	32,8	162,2	43,2
	> 0,9	61,0	32,8	102,2	26,0
TMA	> 0,5	60,3	8,2	162,2	45,9
	> 0,7	36,6	8,2	70,5	22,1
	> 0,9	21,5	8,2	33,1	11,0

Использование метода OLS – по Неслунду и Экслунду – показало достаточно высокую корреляцию результатов измерений как по всей ширине образцов, так и по отдельным участкам, что связано со схожей линейной регрессией.

При обработке данных с помощью SMA с 5-летним сглаживанием наблюдается незначительная обратная закономерность: с увеличением суммарной ширины годовых слоев коэффициент корреляции повышается, что может быть объяснено большей вариативностью полученных данных (более широкой областью рассеивания данных относительно среднего) и, как следствие, ростом стандартного отклонения.

SMA с 11-летним сглаживанием при исследовании методом сверления непригоден, потому что фактическое количество годовых слоев с минимально значимой корреляцией может быть меньше 11 (суммарной шириной 32,8 мм).

К наиболее жестким и точным статистическим методам обработки ширины годовых слоев относятся SMA с 3-летним сглаживанием и TMA, они имеют равные стандартные отклонения, которые являются наименьшими среди полученных всеми методами обработки данных, представленными в работе.

Высокая степень взаимосвязи независимых переменных соответствует коэффициенту корреляции $r > 0,7$. Исходя из вышеизложенного, выполнение дендрохронологических исследований и определение ширины (прироста) годовых слоев древесины сосны методом измерения сопротивления сверлению рекомендуется выполнять с учетом ограничений: максимальное количество годовых слоев в образце – 17 или максимальная суммарная ширина годовых слоев в образце – 36,6 мм.

Основными причинами снижения точности определения радиального прироста методом измерения сопротивления сверлению являются геометрические параметры режущей части тонкого бурового сверла и одновременное взаимодействие режущих кромок сверла с ранней и поздней древесиной в процессе сверления годовых слоев малого радиуса, неточность определения и задания радиального направления просверливания, пороки древесины и возможное трение хвостовика сверла, что согласуется с результатами исследований [20, 21, 24, 26]. В ходе выполнения работы установлено, что немаловажную роль в снижении точности измерения показателей радиального прироста играет также упругость тонкого бурового сверла.

В результате исследований наблюдалось неконтролируемое постепенное изменение траектории сверления с начального момента контакта сверла с поверхностью образца (рис. 5, *a*). Это связано с тем, что в начале процесса сверления происходит незначительное отклонение направления режущей части сверла в сторону, соответствующую направлению первоначального контакта главной режущей кромки сверла с древесиной (точка А на рис. 5, *a*). Фактическая траектория сверления может иметь закругленную форму (рис. 5, *a*). Таким образом, на широких образцах доски наблюдался выход сверла на одну из их пластей. При измерениях может также наблюдаться неконтролируемое изменение направления сверления в процессе просверливания заполненных или пустых полостей разного рода (трещины, смоляные карманы, грибные поражения и биологические повреждения) (рис. 5, *b*). Здесь существуют 2 вида отклонения траектории проникновения тонкого бурового сверла:

при небольшой неперпендикулярности поверхности контакта с направлением подачи, равной $5 \dots 10^\circ$, прослеживается закономерность изменения траектории по закону, описанному выше (рис. 5, *a*);

при значительных углах неперпендикулярности происходит проскальзывание сверла по стенке полости (рис. 5, б), сопровождающееся отклонением траектории в том же направлении, и чем размер полости в плоскости сверления больше, тем больше и сложнее для прогнозирования отклонения.

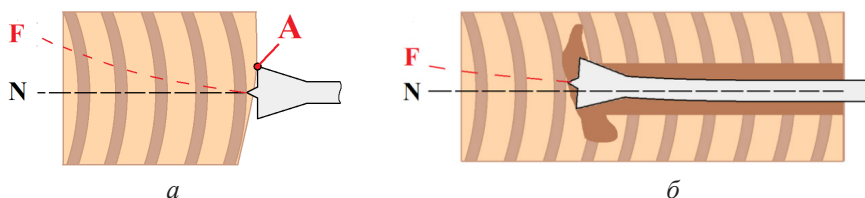


Рис. 5. Изменение направления сверла: а – в начальный момент сверления; б – при просверливании заполненных или пустых полостей (F – фактическое направление сверления; N – номинальное направление сверления)

Fig. 5. Changing the direction of the drill: а – at the initial moment of drilling; б – when drilling filled or empty cavities (F – actual drilling direction; N – nominal drilling direction)

Следует отметить упругие С- и S-образную деформации хвостовика сверла (рис. 6) под воздействием статической и динамической осевой нагрузок. Предполагается, что они не оказывают ощутимого влияния на траекторию сверления, поскольку на глубине свыше 10...15 мм отверстие достаточно плотно заполняется стружкой, что ограничивает изгиб хвостовика сверла. Однако в начале процесса сверления значительная часть тонкого бурового сверла находится в устройстве, а исходя из конструктивных особенностей механизмов стабилизации сверла [5, 6] при сверлении в радиальном направлении отмечаются значительные упругие динамические деформации. При этом чем выше скорость подачи, ширина ранних зон годовичных слоев и их плотность, тем более заметна деформация тонкого бурового сверла. Деформации возникают вследствие последовательных процессов осевого сжатия и частичной релаксации тонкого бурового сверла при просверливании поздних и ранних зон годовичных слоев соответственно. Такая работа сверла может добавлять инструментальную ошибку в результаты измерения сопротивления сверлению, а именно при фиксации сверла и последующем измерении радиального прироста.

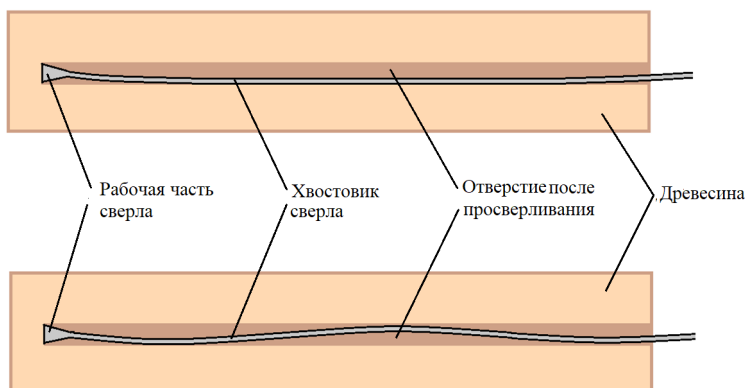


Рис. 6. Упругая деформация хвостовика тонкого бурового сверла: С- (сверху) и S-образная (снизу)

Fig. 6. Elastic deformation of a thin drill bit shank: C-shaped (top) and S-shaped (bottom)

Для повышения точности метода измерения сопротивления сверлению в дендрохронологических исследованиях предлагается:

разработать методику, в том числе с применением специального или вновь разработанного инструмента, для более точного определения сердцевин и радиального просверливания дерева или круглого лесоматериала;

повысить жесткость тонкого бурового сверла;

обеспечить требуемую фиксацию тонкого бурового сверла в процессе его первоначального контакта с древесиной и внутри устройства;

модернизировать устройство и исследовать точность метода, основываясь на прямом измерении усилия подачи сверла при определении ширины годичных слоев, например с помощью тензодатчика.

Заключение

Существенное влияние на точность метода измерения сопротивления сверлению при определении вариации свойств и прироста древесины оказывают технические причины, связанные с упругостью тонкого бурового сверла и конструкцией механизмов его стабилизации, а также невозможность оперативного определения сердцевин древесины для строго радиального направления просверливания.

По результатам выполнения дендрохронологических исследований с помощью устройства ResistYX для получения точных ($r > 0,7$) данных о приросте годичных слоев рекомендуется измерять на одном образце не более 17 годичных слоев, что соответствует средней суммарной ширине годичных слоев 36,6 мм. Ограничения установлены для современных устройств, снабженных упругими тонкими буровыми сверлами с постоянной скоростью подачи, работа которых основана на определении электрической мощности приводов вращения и подачи сверла.

Дальнейшие исследования в обозначенном направлении будут связаны с оценкой точности определения радиального прироста хвойных пород древесины по усилию подачи тонкого бурового сверла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алметов А.Н. Совершенствование конструкции бурава для извлечения кернов древесины из растущих деревьев различных пород: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2001. 174 с.

Almetov A.N. *Improving the Design of a Drill for Extracting Wood Cores from Growing Trees of Various Species*: Cand. Eng. Diss. Mari State Technical University. Yoshkar-Ola, 2001. 174 p. (In Russ.).

2. Демаков Ю.П., Нуреева Т.В. Групповая и индивидуальная изменчивость годичного прироста деревьев по высоте в культурах сосны Марийского Заволжья // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 3(43). С. 25–45.

Demakov J.P., Nureeva T.V. Group and Individual Variability of Annual Tree Height Growth in Pine Plantations of Mari Transvolga Region. *Volga State University of Technology Bulletin. Forest. Ecology. Nature Management*, 2019, no. 3, iss. 43, pp. 25–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.3.25>

3. Колесникова А.А. Исследование свойств древесины по кернам. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 178 с.

Kolesnikova A.A. *Research of Wood Properties by Increment Cores*. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University Publ., 2002. 178 p. (In Russ.).

4. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология / ВГЛТУ. 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: ВГЛТА, 2013. 139 с.

Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dendrochronology*: Voronezh, Voronezh State Academy of Forestry Engineering Publ. 2013. 139 p. (In Russ.).

5. Патент № 95128 U1 РФ, МПК G01N 3/40 (2006.01), G01N 33/46 (2006.01), B23B 41/00 (2006.01). Устройство для измерения сопротивления сверлению: № 2010106686/22: заявл. 24.02.2010: опубл. 10.06.2010 / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов, Т.В. Бычкова.

Sharapov E.S., Chernov V.Yu., Bychkova T.V. *Device for Drilling Resistance Measurements*. Patent RF, no. RU 95128, 2010. (In Russ.).

6. Патент № 2607064 C2 РФ, МПК G01N 3/40 (2006.01), G01N 33/46 (2006.01), B23B 49/00 (2006.01). Устройство для измерения сопротивления исследуемого материала сверлению: № 2014140884: заявл. 09.10.2014: опубл. 10.01.2017 / В.Ю. Чернов, Е.С. Шарапов, Е.В. Смирнова, О.А. Соловьева.

Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Smirnova E.V., Solovieva O.A. *Device for Drilling Resistance Measurements*. Patent RF, no. RU 2607064, 2017. (In Russ.).

7. Румянцев Д.Е. История и методология лесоводственной дендрохронологии: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 109 с.

Rumyantsev D.E. *History and Methodology of Silvicultural Dendrochronology*. Moscow, Moscow State Forest University Publ. 2010. 109 p. (In Russ.).

8. Свидетельство 2016662108 РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ ResistVIEW, 1.0: № 2016619406: заявл. 06.09.2016: зарег. 31.10.2016 / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов, Е.В. Смирнова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «ПГТУ».

Sharapov E.S., Chernov V.Yu., Smirnova E.V. *Certificate on State Registration of the Computer Program no. 2016662108 «ResistVIEW, 1.0»*, 2016. (In Russ.).

9. Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Торопов А.С. Определение плотности древесины методом измерения сопротивления сверлению: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. 200 с.

Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Toropov A.S. *Evaluation of Wood Density Using the Drilling Resistance Measurement Method*. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology Publ. 2019. 200 p. (In Russ.).

10. Чернов В.Ю., Шарапов Е.С., Торопов А.С., Смирнова Е.В., Павлов Д.А. Точность определения плотности древесины методом измерения сопротивления сверлению // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф. КГТУ. Кострома: КГТУ, 2015. С. 42–45.

Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Toropov A.S., Smirnova E.V., Pavlov D.A. The Accuracy of Wood Density Evaluation by Drilling Resistance Measurements. *Proceedings of the third International Conference “Current problems and prospects for the development of the timber industry”*, Kostroma State Technological University. Kostroma, Russian Federation, 2015, pp. 42–45. (In Russ.).

11. Черных Н.Б. Дендрохронология и археология. М.: Нох, 1996. 212 с.

Chernyh N.B. *Dendrochronology and Archeology*. Moscow, Nox Publ. 1996. 212 p. (In Russ.).

12. Шарапов Е.С. Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2019. 340 с.

Sharapov E.S. *Improvement of Methods and Tools for Quasi-nondestructive Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Wood and Wood materials*: Doc. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University, 2019. 340 p. (In Russ.).

13. Шарпов Е.С., Смирнова Е.В. Определение физико-механических свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению // Вестн. ПГТУ. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 4(12). С. 120–134.

Sharapov E.S., Smirnova E.V. Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Wood by the Drilling Resistance Measurement. *Volga State University of Technology Bulletin. Materials. Constructions. Technologies*, 2019, no. 4, iss. 12, pp. 120–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.4.120>.

14. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. 1. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirduyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Hantemirov R.M. *Methods of Dendrochronology. Part 1. Fundamentals of Dendrochronology. Collecting and Obtaining Tree-ring Information*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University Publ., 2000. 80 p. (In Russ.).

15. Chantre G., Rozenberg P. Can Drill Resistance Profiles (Resistograph) Lead to Within-profile and Within-ring Density Parameters in Douglas-fir Wood? *Proceedings of CTIA – International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO). International Wood Quality Workshop: Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value*. Forintek Canada Corp., Sainte-Foy, Québec, Canada, 1997, pp. 41–47.

16. Guller B., Guller A., Kazaz G. Is Resistograph an Appropriate Tool for the Annual Ring Measurement of Pinus Brutia? *Proceedings of the International Conference NDE Safety*. Czech Republic, 2012, pp. 89–94.

17. Kraler A., Beikircher W., Zingerl Ph. Suitability of Drill Resistance Measurements for Dendrochronological Determination. *World Conference on Timber Engineering, Strength and Serviceability – Extreme Events*. Aucklande, New Zealand, 2012, vol. 2. 302 p.

18. Kraler A., Beikircher W., Zingerl Ph. Strength Determination of Aged Wood, From 1250AD to Present, with Nondestructive and Semidestructive Test Methods. *World Conference on Timber Engineering, Strength and Serviceability – Extreme Events*. Aucklande, New Zealand, 2012, vol. 2, 188 p.

19. Mattheck C., Bethge K., Albrecht W. How to Read the Results of Resistograph M. *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*, 1997, vol. 21, iss. 4, pp. 331–346. <https://doi.org/10.1080/03071375.1997.9747179>

20. Nutto L., Biechele T. Drilling Resistance Measurement and the Effect of Shaft Friction – Using Feed Force Information for Improving Decay Identification on Hard Tropical Wood. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 239. *Proceedings of the 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. 22–25 September 2015*, 2015, pp. 154–161.

21. Oliveira J.T.S., Wang X., Vidaurre G. Assessing Specific Gravity of Young Eucalyptus Plantation Trees Using a Resistance Drilling Technique. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, iss. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058>

22. Orozco-Aguilar L., Nitschke C.R., Livesley S.J., Brack C., Johnstone D. Testing the Accuracy of Resistance Drilling to Assess Tree Growth Rate and the Relationship to Past Climatic Conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, vol. 36, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.09.010>

23. Pressler M.R. Der Forstliche Zuwachsbohrer [The forestry increment borer]. *Tharander Jahrbuch. Arnoldische Buchhandlung, Leipzig. Dritte Abtheilung III*, 1866, pp. 137–209. (In Germ).

24. Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E. Resistograph and X-ray Density Charts of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species. *Holzforschung*, 1996, vol. 50, iss. 4, pp. 303–311. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303>
25. Rinn F. Resistographic Visualization of Tree Ring Density Variations. *Proceedings of the International Conference Tree Rings and Environment*. Tucson, AZ, USA, Radiocarbon, 1996, pp. 871–878.
26. Sharapov E., Brischke C., Militz H. Effect of Grain Direction on Drilling Resistance Measurements in Wood. *International Journal of Architectural Heritage*, 2021, vol. 15, iss. 2, pp. 250–258. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1766158>
27. Sharapov E., Wang X., Smirnova E. Drill Bit Friction and its Effect on Resistance Drilling Measurements in Logs. *Proceedings of the 20th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 12–15 September 2017, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2017*, pp. 405–415.
28. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Prediction of Modulus of Elasticity in Static Bending and Density of Wood at Different Moisture Contents and Feed Rates by Drilling Resistance Measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, vol. 77, pp. 833–842. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2>
29. Schimleck L., Dahlen J., Apiolaza L.A., Downes G., Emms G., Evans R., Moore J., Pâques L., Bulcke J.V., Wang X. Non-destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us About Wood Property Variation. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 728. 50 p. <https://doi.org/10.3390/f10090728>
30. Tannert T., Anthony R., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., Rinn F., Widmann R., Yamaguchi N. In-situ Assessment of Structural Timber using Semi-destructive Techniques. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 767–785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>
31. Wang S.Y., Chiu C.M., Lin C.J. Application of the Drilling Resistance Method for Annual Ring Characteristics: Evaluation of Taiwania (*Taiwania cryptomeribides*) Trees Grown with Different Thinning and Pruning Treatments. *Journal of Wood Science*, 2003, vol. 49, iss. 2, pp. 116–124. <https://doi.org/10.1007/s100860300018>
32. Wang S.Y., Lin C.J. Application of the Drill Resistance Method for Density Boundary Evaluation of Earlywood and Latewood of Taiwania (*Taiwania cryptomerioides* Hay.) Plantation Wood. *Taiwan Journal of Forest Science*, 2001, vol. 16, iss. 3, pp. 196–199.

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 674.048.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-151-163

Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*)

С.Г. Елисеев, канд. техн. наук; ResearcherID: [ABF-2131-2020](https://orcid.org/0000-0002-7746-0158),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Д.В. Дук[✉], лаборант; ResearcherID: [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; vnermolin@yandex.ru, s-555s@yandex.ru, danil211199ler@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 29.07.22 / Одобрена после рецензирования 27.10.22 / Принята к печати 02.11.22

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности применения лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*). Древесина пихты имеет относительно низкие физико-механические свойства и невыразительный внешний вид, из-за чего не пользуется высоким спросом. Повышение декоративных свойств пихтовой древесины позволит производить из нее отделочные материалы. Обзор научной литературы установил, что существующие технологии крашения древесины мало подходят для труднопропитываемой древесины пихты. Поэтому с учетом одновременной возможности повышения проницаемости древесины и ее контролируемого окрашивания для формирования текстуры была использована лазерная перфорация древесины. В ходе исследования изучены особенности окрашивания перфорированной лазером древесины пихты в зависимости от режимных параметров пропитки и структуры древесины. Для этого в образцах древесины пихты (165×65×32 мм) при помощи лазера были прожжены каналы диаметром до 0,2 мм и глубиной 15 мм. Затем образцы древесины пропитывались в автоклаве. Режимные параметры пропитки определены в соответствии с планом 2-факторного эксперимента: давление 0,2; 0,5 и 0,8 МПа, продолжительность пропитки 30; 225 и 480 мин. Показано, что при пропитке перфорированной древесины окрашивающий раствор в первую очередь проникает через прожженные лазером каналы и в основном продвигается вдоль волокон. В зависимости от продолжительности пропитки и давления краситель проходит от прожженных каналов вдоль волокон на расстояние от 10,9 до 24,6 мм. Поперек волокон краситель проникает незначительно и суммарно в обе стороны от отверстий окрашенные зоны в зависимости от давления и продолжительности пропитки имеют ширину от 1,3 до 1,7 мм. Установлено, что режимные параметры пропитки значительно влияют на размеры окрашенных зон вдоль волокон и в абсолютных значениях мало влияют на поперечное окрашивание. При пропитке перфорированной древесины большее воздействие на размер окрашенных участков древесины из двух изученных факторов оказывает давление. Практически доказана возможность применения разработанной технологии для формирования искусственной текстуры древесины, в том числе имитирующей ценные породы древесины.

Ключевые слова: пихта, пихта сибирская, *Abies sibirica*, древесина, лазер, лазерная перфорация, пропитка, автоклавная пропитка, текстура древесины, крашение, декоративные свойства древесины

Для цитирования: Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 151–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-151-163>

Original article

Using Laser Perforation to Enhance Decorative Properties of Siberian Fir (*Abies sibirica*) Wood

Sergey G. Eliseev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABF-2131-2020](https://orcid.org/0000-0002-7746-0158),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Danil V. Duk[✉], Laboratory Assistant; ResearcherID: [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskiy Rabochiy Ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vnermolin@yandex.ru, s-555s@yandex.ru, danil2111991er@mail.ru[✉]

Received on July 29, 2022 / Approved after reviewing on October 27, 2022 / Accepted on November 2, 2022

Abstract. This paper presents research into the possibilities of using laser perforation to enhance the decorative properties of Siberian fir (*Abies sibirica*) wood. Fir wood is characterized by fairly modest physical and mechanical properties and featureless appearance, which is why it is in low demand. With enhanced decorative properties, fir wood could find its use in the production of finish materials. The literature review reveals that the existing wood dyeing technologies are not really effective for the hard-to-impregnate fir wood. Therefore, laser perforation was used to achieve higher wood impregnation and its controlled coloring to form the texture. The study also explored the features of dyeing laser-perforated fir wood, depending on the set parameters of impregnation and wood structure. To do so, the fir samples (with the size of 165×65×32 mm) were laser perforated to form slots up to 0.2 mm in diameter and 15 mm deep. Then the samples were impregnated in an autoclave. The set parameters were determined in accordance with the two-factor experiment schedule: the pressure standing at 0.2, 0.5 and 0.8 MPa, with the impregnation time of 30, 225 and 480 min. The study showed that when perforated wood is impregnated, the dyeing solution penetrates the laser-cut slots first and mainly spreads along the wood fibers. Depending on the impregnation time and pressure applied, the dye moves from the perforated slots along the wood fibers covering a distance of 10.9 mm to 24.6 mm. The dye does not spread as well across the fibers, only coloring a total width of 1.3 to 1.7 mm both ways from the slot depending on applied pressure and time of impregnation. It was found that, first and foremost, the set parameters affect the size of colored areas along the wood fibers and make little difference to lateral coloring in absolute values. Pressure applied to perforated wood during impregnation was determined to have the biggest impact on the size of colored areas. The study proves it possible to use the developed technology in forming artificial wood textures, including those that imitate valuable wood species.



Keywords: fir, Siberian fir, *Abies sibirica*, wood, laser, laser perforation, impregnation, autoclave impregnation, wood texture, dyeing, wood decorative properties

For citation: Eliseev S.G., Ermolin V.N., Duk D.V. Using Laser Perforation to Enhance Decorative Properties of Siberian Fir (*Abies sibirica*) Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 151–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-151-163>

Введение

Пихта сибирская (*Abies sibirica*) является одной из широко распространенных лесообразующих пород в Сибирском федеральном округе. Только на территории Красноярского края (по данным лесного плана) пихтовые леса занимают площадь 5770,8 тыс. га (7,3 % площади хвойных в регионе) с общим запасом древесины 972,895 млн м³ (10,2 % запаса хвойной древесины в регионе). В отличие от востребованных на внешнем и внутреннем рынках хвойных пород, таких как сосна, лиственница и ель, пихтовая древесина имеет весьма ограниченный спрос. Это в первую очередь объясняется относительно низкими физико-механическими свойствами древесины данной породы, а также ее невыразительным внешним видом.

Одним из путей расширения сфер использования пихтовой древесины может стать ее применение в производстве декоративных и отделочных материалов, где, как правило, внешний вид древесины ценится больше, чем высокие физико-механические свойства. Однако в естественном виде древесина пихты мало подходит для указанной цели, поскольку имеет светлую окраску и невыразительную текстуру. Без существенных изменений внешнего вида пихтовой древесины трудно представить ее применение в производстве изделий, в которых важны декоративные свойства древесины.

Декоративные свойства древесины зависят от таких физических показателей, как цвет и текстура. Древесина ценных пород в большинстве случаев имеет насыщенную окраску и контрастные по цвету элементы строения, формирующие выраженную текстуру. При этом древесина основных лесообразующих пород, произрастающих в северных и умеренных широтах (в том числе и пихта), в естественном виде не отличается высокими декоративными свойствами. Поэтому такая древесина низко ценится или практически не используется в производстве товаров, к которым предъявляются повышенные эстетические требования [20].

В настоящее время существует большое количество методов окрашивания и проявления естественной или формирования искусственной текстуры древесины. С учетом принципиальных особенностей их можно условно разделить на поверхностное и глубокое крашение древесины. При поверхностном крашении имеется возможность не только изменять цвет древесины, но и проявлять ее естественную текстуру за счет различной пористости ранней и поздней зон годичного слоя и формирования «эффекта негатива». Также текстура на поверхности древесины может формироваться и за счет нанесения красителя различными способами печати. В целом методы поверхностного облагораживания древесины, как правило, достаточно технологичны и производительны, но не всегда обеспечивают естественный внешний вид окрашенного материала, а

верхний слой может легко стираться и повреждаться в процессе эксплуатации. Кроме того, при поверхностном крашении заготовки не могут подвергаться дальнейшей механической обработке, а в изделиях обновляться путем шлифования или циклевания [5, 11, 18, 22, 24].

Указанных выше недостатков лишены изделия из глубоко окрашенной древесины. Глубокое крашение древесины производят при помощи красителя в автоклаве при избыточном давлении, такой вид пропитки даже бывает сквозным. При этом в ходе пропитки древесине придают не только желаемый цвет, но и за счет неравномерного распределения проводящих капилляров, по которым проникает окрашивающая жидкость, проявляют ее естественную текстуру [5, 7–10, 14, 15, 17–19].

При всех преимуществах возможности окрашивания за счет автоклавной пропитки древесины красителем без ее специальной подготовки имеется ряд ограничений. Формируемая таким способом текстура в большинстве случаев ограничивается зонами годичного слоя, что не позволяет создавать более сложные и разнообразные рисунки. Кроме того, автоклавная пропитка подходит только для хорошо пропитываемых заболонных пород. Ядровые и спелодревесные породы в соответствии с ГОСТ 20022.2–80 относятся к труднопропитываемым. При автоклавной пропитке такой древесины глубина продвижения пропиточного раствора весьма ограничена и в зависимости от породы составляет не более 2–5 мм поперек волокон и 200–300 мм вдоль волокон [7].

В настоящее время разработан целый ряд способов избирательного окрашивания древесины, позволяющих не только проявить естественную текстуру древесины, но и с учетом технических ограничений сформировать искусственную [1–3, 12, 13, 18]. Перечисленные способы крашения по большей части не получили распространения ввиду низкой технологичности, ограниченных возможностей по формированию различных текстур, а также практически неприменимы для труднопропитываемой древесины.

Из проведенного анализа литературных данных мы видим, что определяющим фактором при глубоком крашении труднопропитываемой древесины выступает ее проницаемость. Поэтому было принято решение подойти к проблеме глубокого крашения пихтовой древесины с позиции повышения ее проницаемости.

Существует широкий спектр методов повышения проницаемости древесного сырья: путем накалывания [4], использования переменного давления [7], предварительного заражения древоокрашивающими грибами [4], повышения температуры [9], обработки сверхвысокими частотами [23, 25, 26, 30, 32] или ультразвуком [21] и т. д. Большинство из перечисленных методов не получили распространения, поскольку нарушают целостность древесины, энергозатратны, технически сложны при реализации в промышленных условиях, имеют неприемлемо длительную продолжительность процесса и др., что является серьезными недостатками.

Из рассмотренных вариантов повышения проницаемости древесины наибольший интерес вызывает метод с использованием лазера. В ходе исследований [27–29, 31, 33] изучалась возможность применения лазерного луча для создания каналов, позволяющих повысить проницаемость древесины. Исследователями было установлено, что в результате обработки CO₂-лазером лигнин и целлюлоза разлагаются при мгновенном росте температуры из-за излучения мощного

инфракрасного света. В результате изменяется пористая структура древесины. Глубокие отверстия, образованные лазерным лучом, формируют каналы, обеспечивающие введение пропиточной жидкости в глубь заготовок, и количество поглощаемой жидкости увеличивается. Данный метод позволяет достичь сквозного проникновения пропиточного раствора на всю толщину заготовки. А глубина прожигаемых каналов может достигать 100 мм и более.

Из представленных в работах [27–29, 31, 33] данных следует, что прожигаемые лазером в древесине каналы позволяют повысить ее проницаемость на отдельных локальных участках. Поэтому для равномерного пропитывания заготовок раствором прожигаемые отверстия размещают по схеме, способствующей смыканию фронтов пропитки.

С учетом указанной информации было выдвинуто предположение, что особенности локализации пропиточного раствора в древесине и малый диаметр прожигаемых отверстий – до 0,2 мм – могут иметь хороший потенциал для формирования искусственной текстуры древесины. Предложено создавать текстуру древесины за счет чередования окрашенных и неокрашенных зон, а разнообразие рисунков обеспечить разными схемами размещения отверстий. Для подтверждения выдвинутого предположения проведены предварительные исследования, которые доказали принципиальную возможность использования лазерной перфорации для избирательного окрашивания древесины [6, 16].

В целях дальнейшего изучения применимости данной технологии для формирования искусственной текстуры древесины пихты сибирской было принято решение провести исследования, направленные на анализ влияния параметров автоклавной пропитки на особенности локализации красителя в древесине.

Объекты и методы исследования

На 1-м этапе работ требовалось установить особенности распространения фронтов окрашивающего состава в пихтовой древесине в зависимости от давления и продолжительности пропитки. С этой целью из древесины пихты сибирской влажностью 9 % были изготовлены образцы размерами 165×65×32 мм (длина вдоль волокон×ширина×толщина). В полученных образцах при помощи лазерного луча последовательно в шахматном порядке прожигались отверстия диаметром до 0,2 мм на расстоянии друг от друга поперек волокон 10 мм и вдоль волокон 20 мм (рис. 1). Расстояние между отверстиями было определено исходя из полученных ранее предварительных экспериментальных данных с учетом необходимости обеспечения несмыкания фронтов пропитки древесины. Глубина прожигаемых отверстий составляла 15 мм. Продолжительность лазерного импульса – 0,25 с на одно отверстие. В каждом образце прожжено 45 отверстий.

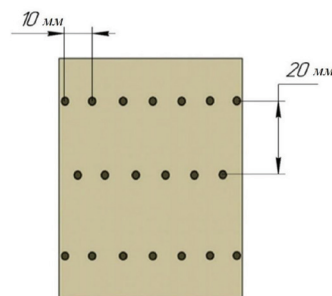


Рис 1. Схема размещения прожигаемых каналов в образцах древесины

Fig. 1. Pattern of laser-cut slots in wood samples

После лазерной перфорации заготовки помещались в автоклав, где при варьируемом избыточном давлении (0,2; 0,5; 0,8 МПа) пропитывались 3%-м водным раствором красителя «Совелан коричневый М». Продолжительность опытных пропиток составляла: 30, 255 и 480 мин. Перед пропитыванием торцы образцов были подвергнуты гидроизоляции в целях предотвращения проникновения пропиточного раствора вдоль волокон через поперечный разрез древесины. Режимные параметры пропитки были определены в соответствии с планом 2-факторного эксперимента.

После пропитки для перераспределения красителя образцы выдерживались 24 ч при нормальных условиях. Затем они помещались в сушильный шкаф, где высушивались до влажности 9 ± 3 %.

Для проявления фронтов пропитки высушенные образцы строгались на рейсмусовом станке на глубину 2 мм. После этого при помощи микроскопа МБС-10, оснащенного камерой Scopetek DCM-310, с использованием программного обеспечения ScorePhoto производилось измерение длины и ширины фронта пропитки с точностью до 0,1 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

После пропитывания, высушивания и снятия верхнего окрашенного слоя образцы перфорированной древесины пихты имели четко выраженные локально окрашенные участки (рис. 2).

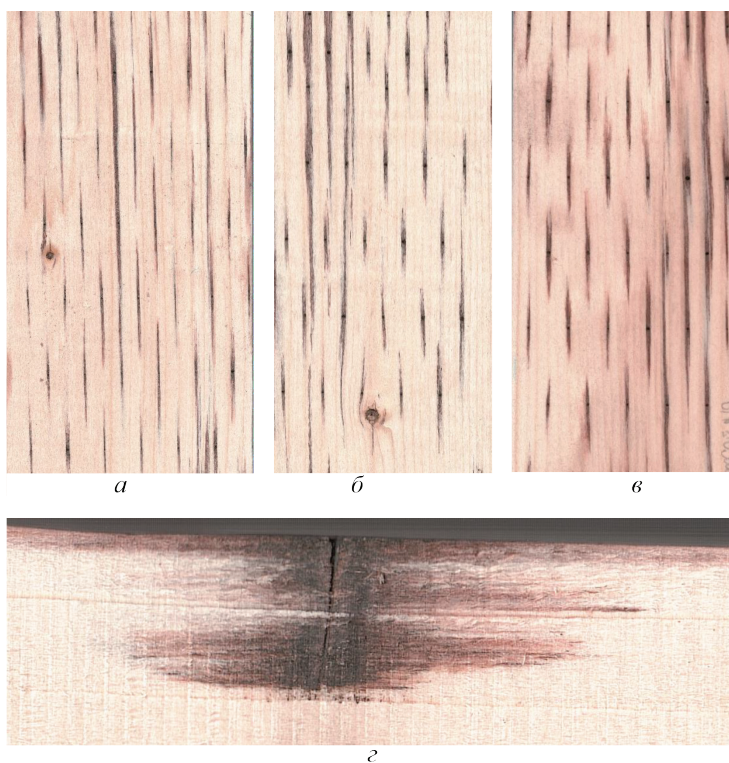


Рис. 2. Локальное окрашивание древесины пихты, перфорированной лазером: *а, б, в* – на пласти при давлении 0,2; 0,5 и 0,8 МПа соответственно; *г* – на радиальном разрезе

Fig. 2. Localized dyeing of laser-perforated fir wood: *a, b, v* – on the face under the pressure of 0.2, 0.5 and 0.8 MPa, accordingly; *z* – on the radial cut

При рассмотрении особенностей локализации красителя видно, что в процессе пропитки окрашивающий раствор проникал в заготовки сначала через прожженные в древесине отверстия, а затем перераспределялся преимущественно вдоль волокон и незначительно поперек волокон. В образцах древесины, пропитанных при высоком давлении, была отмечена бóльшая интенсивность окрашивания древесины, но по мере приближения к границе пропитанной зоны наблюдалось постепенное снижение насыщенности цвета. Образцы, пропитанные при давлении 0,2 МПа, имели более однородные по цвету локально окрашенные участки.

Результаты измерений окрашенных участков древесины вдоль волокон, представленные в табл. 1, позволили выявить следующие особенности. Максимальное продвижение фронта пропитки наблюдалось вдоль волокон при продолжительности пропитки 480 мин. При одинаковой длительности пропитки наибольшую протяженность окрашенные участки имели в образцах, пропитанных при давлении 0,8 МПа. С уменьшением давления пропитывания отмечалось и снижение размера окрашенной зоны. Наименьшая разница по длине пропитанных участков при различном давлении наблюдалась в первые 30 мин пропитки. Причем за 30 мин вне зависимости от давления пропитывалось более чем 50 % от общей длины окрашенного участка. В дальнейшем прирост фронтов пропитки предсказуемо замедлялся, и к 480 мин окрашенная зона увеличивалась примерно в 2 раза. Наибольшая разница по длине пропитанных зон наблюдалась при 255-минутной пропитке, а к 480 мин различие между вариантами пропитки уменьшалось. Наиболее низкая протяженность фронта пропитки вдоль волокон практически во всех случаях характерна для образцов, пропитанных при давлении 0,2 МПа. Образцы, пропитанные при давлении 0,8 МПа, превышали их по длине окрашенных участков на 31,0–81,5 %, а при 0,5 МПа – на 11,7–36,1 %. При сравнении образцов, пропитанных при давлении 0,8 и 0,5 МПа, обнаружено, что образцы, подвергнутые действию более высокого давления, имели пропитанные области больше в среднем на 6,9–33,5 %. Также необходимо отметить, что вне зависимости от режимных параметров пропитки при попадании прожигаемого участка в позднюю зону годичного слоя происходило увеличение протяженности окрашенной зоны до 1,5–2 раз в сравнении с ранней.

Таблица 1

Продвижение фронта пропитки вдоль волокон древесины пихты**Advancement of the impregnation front along the fibers**

Давление, МПа	Продолжительность пропитки, мин	Длина окрашенных участков, мм
0,2	30	10,9±4,20
	255	12,9±4,14
	480	16,9±3,72
0,5	30	12,2±5,28
	255	17,6±6,09
	480	23,0±9,17
0,8	30	14,3±5,90
	255	23,5±9,80
	480	24,6±6,99

Помимо протяженности фронта пропитки вдоль волокон в ходе исследований фиксировалась и ширина пропитанной зоны. Поскольку размер окрашенных участков поперек волокон был небольшим и часто они имели эксцентричное размещение, то измерение ширины производилось суммарно по обе стороны отверстий. Результаты измерений фронтов пропитки поперек волокон представлены в табл. 2.

Таблица 2

Продвижение фронта пропитки поперек волокон древесины пихты
Advancement of the impregnation front across the fibers

Давление, МПа	Продолжительность пропитки, мин	Ширина окрашенных участков, мм
0,2	30	1,20±0,06
	255	1,32±0,03
	480	1,72±0,08
0,5	30	1,39±0,07
	255	1,49±0,06
	480	1,73±0,08
0,8	30	1,41±0,04
	255	1,60±0,04
	480	1,72±0,05

Из данных табл. 2 мы видим, что в зависимости от параметров давления и продолжительности пропитки ширина фронта пропитки варьировала следующим образом. Наименьшее продвижение пропиточного раствора было отмечено при 0,2 МПа. В сравнении с 0,5 и 0,8 МПа при 30-минутной пропитке показатели были ниже на 13,7–14,9 %, а при 255-минутной – на 11,4–17,5 %. При пропитке древесины в течение 480 мин вне зависимости от давления ширина пропитанной зоны была примерно одинаковой – 1,7 мм. Наибольшее продвижение фронта пропитки поперек волокон было зафиксировано при продолжительности пропитки 480 мин. Несмотря на существенную относительную разницу по ряду испытаний, в целом абсолютные значения продвижения фронта пропитки поперек волокон оказались незначительными – в пределах 1,2–1,7 мм, что в 10–14 раз меньше размеров пропитанных участков вдоль волокон (см. табл. 1).

Учитывая полученные результаты по пропитываемости древесины пихты вдоль и поперек волокон, был сделан промежуточный вывод, что режимные параметры пропитки в первую очередь влияют на размеры окрашенных зон вдоль волокон. В целях выявления влияния варьируемых факторов (табл. 3) при автоклавной пропитке перфорированной древесины пихты на продвижение фронта пропитки вдоль волокон была построена диаграмма Парето (рис. 3).

Таблица 3

Варьирование факторов автоклавной пропитки

Levels of variation of factors

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования		
		-1	0	1
Давление, МПа	А	0,2	0,5	0,8
Продолжительность пропитки, мин	В	30	255	480

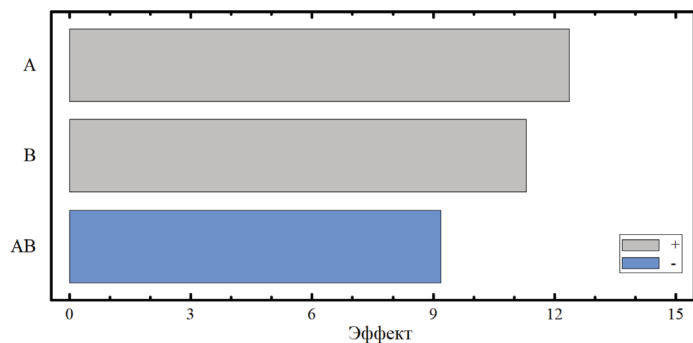


Рис. 3. Уровень влияния факторов на продвижение фронта пропитки вдоль волокон (обозначения – см. табл. 3)

Fig. 3. Level of influence of various factors on impregnation front advancement along fibers (signs – look at Table 3)

Из рис. 3 мы видим, что наибольшее влияние на продвижение пропиточного раствора вдоль волокон оказывает применяемое избыточное давление, в то время как длительность пропитки имеет несколько меньшее значение.

С учетом полученных зависимостей для апробации разрабатываемой технологии было решено изготовить образцы древесины с искусственной текстурой. В качестве прототипа выступила текстура древесины «Зебрано», пользующаяся большой популярностью при производстве мебели и отделочных материалов. В заготовках из древесины пихты прожигались отверстия глубиной 15 мм. Расстояние между отверстиями определялось по исходному образцу текстуры «Зебрано» с использованием полученных зависимостей распространения фронтов пропитки, расстояние обеспечивало их разделение или смыкание. Пропитка осуществлялась в автоклаве при избыточном давлении 0,8 МПа в течение 480 мин. После высушивания и снятия 2 мм верхнего окрашенного слоя производилось сравнение полученных образцов с образцом натуральной древесины. Из рис. 4 мы видим, что перфорированная окрашенная древесина пихты получила текстуру, имеющую схожий вид с оригинальным «Зебрано».

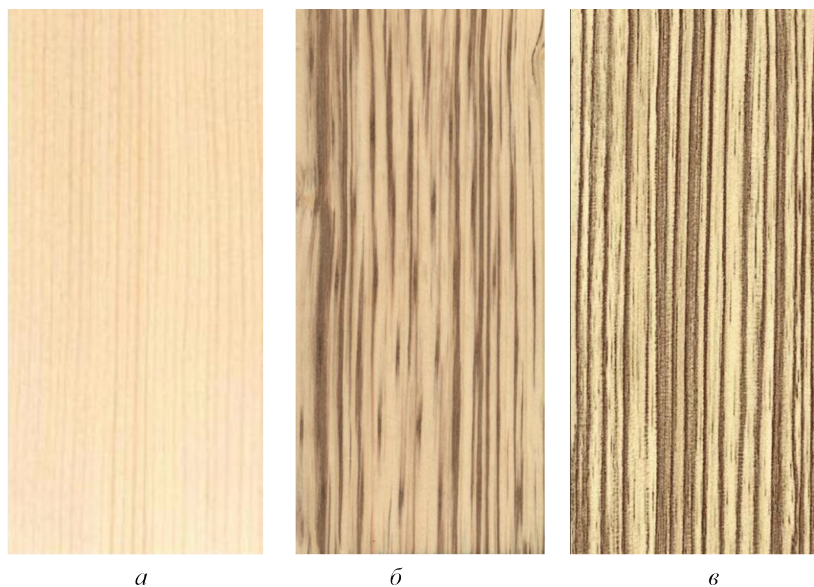


Рис. 4. Внешний вид древесины: *a* – древесина пихты; *b* – древесина пихты, перфорированная лазером и окрашенная; *c* – натуральная древесина «Зебрано»

Fig. 4. Wood appearance: *a* – fir wood; *b* – fir wood perforated by laser and colored with dye; *c* – natural Zebrawood

Выводы

1. Результаты работы свидетельствуют о том, что предлагаемый способ формирования текстуры древесины пихты сибирской за счет ее перфорации лазером с последующей автоклавной пропиткой красителем позволяет эффективно и управляемо окрашивать труднопропитываемую древесину на заданных участках, тем самым формируя искусственную текстуру.

2. Формируемая рассматриваемым способом текстура имеет естественный вид благодаря проявлению при окрашивании естественных неоднородностей древесины.

3. Режимные параметры пропитки перфорированной древесины необходимо определять в зависимости от планируемых размеров окрашиваемых вдоль волокон участков в соответствии с требованиями к конечному результату крашения:

если не нужна высокая точность воспроизведения исходного изображения, допускается (необходима) вариация итоговой текстуры древесины (с учетом естественных особенностей) и требуется обеспечить наименьшее количество прожигаемых отверстий, то следует применять давление – от 0,5 до 0,8 МПа, продолжительность пропитки – от 225 до 480 мин;

для детального воспроизведения типового рисунка рекомендуется давление от 0,2 до 0,8 МПа и продолжительность пропитки не более 30 мин.

4. Из-за различной проницаемости ранней и поздней зон годичного слоя при создании текстур, требующих более высокой точности воспроизведения заданного рисунка, необходимо использовать заготовки тангенциального раскроя.

5. Финишная отделка перфорированной и окрашенной пихтовой древесины позволяет сделать прожженные лазером отверстия практически незаметными для невооруженного глаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 54011 А1 СССР, МПК В05D 7/06 (1995.01), В27К 5/02 (1995.01). Способ улучшения текстуры древесины: № 693: заявл. 23.02.1937: опубл. 31.10.1938 / Г.Л. Элькишек.

El'kishek G.L. *Method for Improving the Texture of Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 54011, 1938. (In Russ.).

2. А. с. 164108 А1 СССР, МПК В27К 3/10 (1995.01). Устройство для пропитки срубленной древесины: № 829507/29-14: заявл. 06.04.1963: опубл. 30.07.1964 / С.А. Черненко.

Chernenko S.A. *Device for Impregnation of Felled Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 164108 А1, 1964. (In Russ.).

3. А. с. 1471988 А1 СССР, МПК А01G 7/06 (2006.01). Способ окрашивания древесины на корню: № 4216231: заявл. 09.02.1987: опубл. 15.04.1989 / Е.Ф. Нагорный.

Nagornyj E.F. *Method of Wood Coloring at the Root*. USSR, no. SU147988 А1, 1989. (In Russ.).

4. Баракс А.М., Никифоров Ю.Н. Пропитка древесины путем применения наколов. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 176 с.

Baraks A.M., Nikiforov J.N. *Impregnation of Wood by Application of Pricks*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 176 p. (In Russ.).

5. Беляев Е.Ю., Ермолин В.Н., Мелешико А.В., Соколов В.Л. Крашение древесины (обзор) // Химия раст. сырья. 1999. № 2. С. 5–18.

Belyaev E.J., Ermolin V.N., Meleshko A.V., Sokolov V.L. Wood Dyeing (Overview). *Chemistry of plant raw materials*, 1999, no. 2, pp. 5–18. (In Russ.).

6. Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Повышение декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*) // Лесной и химический комплекс–проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 29 окт. 2021 г. Красноярск, 2022. С. 206–208.

Eliseev S.G., Ermolin V.N., Duk D.V. Increasing the Decorative Properties of Siberian Fir Wood (*Abies sibirica*). *Mezhvuz. Sbor. Lesnoj i himicheskij kompleksy-problemy i resheniya*, Krasnoyarsk, 2022, pp. 206–208. (In Russ.).

7. Ермолин В.Н. Основы повышения проницаемости жидкостями древесины хвойных пород: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2001. 332 с.

Ermolin V.N. *Fundamentals of Increasing the Permeability of Coniferous Wood Liquids*: Doc. Eng. Diss. Krasnoyarsk, 2001. 332 p. (In Russ.).

8. Каргашина Е.В. Исследование влияния насыщенности красителей на пропитываемость древесины // Науч. вестн. МГУ. 2010. № 8. С. 38–40.

Kargashina E.V. The Influence of Saturating Composition to the Penetrating Power of Wood. *Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*, 2010, no. 8, pp. 38–40. (In Russ.).

9. Клупт Ф.Б., Бродоцкий А.И. Глубокая прокраска древесины в автоклавах. М.; Л.: Гослбумиздат, 1958. 68 с.

Klupt F.B., Brodockij A.I. *Deep Staining of Wood in Autoclaves*. Moscow, Leningrad: Goslebumizdat Publ., 1958. 64 p. (In Russ.).

10. Кушнирская М.Ц. Крашение древесины в производстве мебели. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 116 с.

Kushnirskaya M.C. *Wood Dyeing in Furniture Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 116 p. (In Russ.).

11. Лукаш А.А. Формирование фактуры с ярко выраженной текстурой на поверхности древесины // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2020. № 58. С. 183–187.

Lukash A.A. Formation of a Texture with a Pronounced Grain on the Wood Surface. *Mezhvuz. Sbor. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2020, no. 58, pp. 183–187. (In Russ.).

12. Патент 2014994 С1 РФ, МПК В27К 3/10 (2006.01). Устройство для пропитки под давлением: № 5009582/05: заявл. 23.08.1991: опубл. 30.06.1994 / В.И. Бычин, А.А. Прошкин.

Buchin V.I., Proshkin A.A. *Pressure Impregnation Device*. Patent RF, no. RU 2014994 C1, 1994. (In Russ.).

13. Патент 2375171 С2 РФ, МПК В27К 5/02 (2006.01). Способ окрашивания круглого лесоматериала: № 2007104971/02: заявл. 09.02.2007: опубл. 10.12.2009 / Э. Липшанс, Я. Маковскис.

Lipshas E., Makovskis Y. *Method for Coloring Round Timber*. Patent RF, no. RU 2375171 C2, 2009. (In Russ.).

14. Патент 2470770 С1 РФ МПК В27К 5/02 (2006.01), В27К 3/08 (2006.01). Способ облагораживания древесины: № 2011128459/13: заявл. 08.07.2011: опубл. 27.12.2012 / В.Л. Соколов, М.А. Баяндин, П.П. Звонарева.

Sokolov V.L., Bayandin M.A., Zvonareva P.P. *Method of Wood Refinement*. Patent RF, no. RU 2470770 C1, 2012. (In Russ.).

15. Патент 2726556 С1 РФ МПК В27К 3/02 (2006.01), В27К 5/04 (2006.01). Способ получения древесины с измененной текстурой: № 2019119572: заявл. 21.06.2019: опубл. 14.07.2020, бюл. № 20 / В.А. Шамаев, Д.А. Паринов, И.Н. Медведев, Е.В. Поздняков, А.М. Волганкин.

Shamaev V.A., Parinov D.A., Medvedev I.N., Pozdnyakov E.V., Volzhankin A.M. *Method of Obtaining Wood with a Modified Texture*. Patent RF, no. RU 2726556 C1, 2020. (In Russ.).

16. Патент 2764696 С1 РФ, МПК В27К 3/08 (2006.01). Способ формирования текстуры древесины: № 2021113108: заявл.: 05.05.2021. опубл.: 19.01.2022 / В.Н. Ермолин, С.Г. Елисеев, Д.В. Дук.

Ermolin V.N., Eliseev S.G., Duk D.V. *Wood Texture Formation Method*. Patent RF, no. RU 2764696 C1, 2022. (In Russ.).

17. Соколов В.Л. Автоклавная технология глубокого крашения древесины хвойных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2000. 20 с.

Sokolov V.L. *Coniferous Wood Deep Dyeing Autoclave Technology*: Cand. Eng. Diss. Krasnoyarsk, 2000. 20 p. (In Russ.).

18. Трубников Н.А. Разработка технологии улучшения текстуры древесины мягких лиственных пород избирательным окрашиванием и прессованием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 16 с.

Trubnikov N.A. *Development of Technology for Improving the Texture of Soft Hardwoods by Selective Staining and Pressing*: Cand. Eng. Diss. Voronezh, 2009. 16 p. (In Russ.).

19. Трубников Н.А. Анализ декоративных признаков древесины и модельное исследование изменения текстуры древесины // Лесотехн. журн. 2011. № 3(3). С. 31–37.

Trubnikov N.A. Analysis of Decorative Features of Wood and Model Study of Wood Texture Changes. *Lesotekhnicheskij Zhurnal*, 2011, no. 3, iss. 3, pp. 31–37. (In Russ.).

20. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Timber Science and Forestry Merchandising*. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet lesa Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

21. Шамаев В.А. Воздействие ультразвукового и импульсного магнитного поля на древесину // Технология и оборудование деревообработки в XXI веке: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2008. Вып. 4. С 38–44.

Shamaev V.A. The effect of Ultrasonic and Pulsed Magnetic Fields on Wood. *Mezhvuz. Sbor. Tekhnologiya i Oborudovanie Derevoobrabotki v XXI veke*, 2008, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.).

22. Шетько С.В., Игнатович Л.В., Гайдук С.С., Чуиков А.С. Применение технологии печати для имитации текстуры ценных пород древесины при производстве мебели // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесн. хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 2(234). С. 217–222.

Shet'ko S.V., Ignatovich L.V., Haiduk S.S., Chuikov A.S. Application of Printing Technology to Imitate the Texture of Precious Wood in the Furniture Production. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2020, no. 2(234), pp. 217–222. (In Russ.).

23. Dömény J., Koiš V., Dejmál A. Microwave Radiation Effect on Axial Fluid Permeability in False Heartwood of Beech (*Fagus sylvatica* L.). *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 372–380. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.372-380>

24. Fukuta S., Nomura M., Ikeda T., Yoshizawa M., Yamasaki M., Sasaki, Y. UV-laser Incisions to Apply Wood-plastic Compositions to Wood Surfaces. *Journal of Wood Science*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 28–35. <https://doi.org/10.2488/jwrs.64.28>

25. He S., Lin L., Fu F., Zhou Y., Fan M. Microwave Treatment for Enhancing the Liquid Permeability of Chinese Fir. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 1924–1938. <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.1924-1938>

26. Hong-Hai L., Qing-Wen W., Lin Y., Tao J., YingChun C.A.I. Modification of Larch Wood by Intensive Microwave Irradiation. *Journal of Forestry Research*, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 237–240. <https://doi.org/10.1007/BF02856823>

27. Islam M.M., Ando K., Yamauchi H., Kamikawa D., Harada T., Khalil A., Hattori N. Impregnation of Laser Incised Wood of Douglas Fir, and Japanese Cedar by Dipping (Passive Impregnation) in Solutions of Copper Azole (CuAz-B) and a Fire Retardant (PPC). *Wood Research*, 2013, vol. 68, no. 3, pp. 353–360. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0140>

28. Islam M.N., Ando K., Yamauchi H., Kobayashi Y., Hattori N. Comparative Study between Full Cell, and Passive Impregnation Method of Wood Preservation for Laser Incised

Douglas Fir Lumber. *Wood Science and Technology*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 343–350. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0168-z>

29. Islam N., Ando K., Yamauchi H., Hattori N. Effects of Species and Moisture Content on Penetration of Liquid in Laser Incised Lumber by the Passive Impregnation Method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2009, vol. 67, no. 2, pp. 129–133. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0292-y>


30. Li X.J., Lu K.Y., Lin L.Y., Zhou Y.D., Cai Z.Y., Fu F. Fundamental Characteristics of Microwave Explosion Pretreatment of Wood I. Properties of Temperature Development. *Forestry Studies in China*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1007/s11632-010-0004-7>

31. Listyanto T., Ando K., Yamauchi H., Hattori N. Microwave and Steam Injection Drying of CO₂ Laser Incised Sugi Lumber. *Journal of Wood Science*, 2013, vol. 59, no. 4, pp. 282–289. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1331-9>

32. Terziev N., Daniel G., Torgovnikov G., Vinden P. Effect of Microwave Treatment on the Wood Structure of Norway Spruce and Radiata Pine. *BioResources*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 5616–5626. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5616-5626>

33. Wang Y., Ando K., Hattori N. Changes in the Anatomy of Surface and Liquid Uptake of Wood after Laser Incising. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, no. 3, pp. 447–455. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0497-4>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 543.632.538

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-164-183

**Функциональный состав и структурные особенности лигнинов
высших растений**

Ю.А. Сыпалова[✉], мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAF-9372-2021](https://orcid.org/0000-0001-7901-6897),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7901-6897>

С.Л. Шестаков, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [F-5498-2019](https://orcid.org/0000-0001-9057-5577),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9057-5577>

А.Ю. Кожевников, канд. хим. наук, зам. дир. ЦКП НО «Арктика»;


ResearcherID: [Q-9555-2016](https://orcid.org/0000-0002-3453-9229), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3453-9229>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Центр коллективного пользования научным оборудованием «Арктика», наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; yuliya.popova01@mail.ru[✉], laston85@mail.ru, akozhevnikov@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.22 / Одобрена после рецензирования 14.01.23 / Принята к печати 19.01.23

Аннотация. Одним из эффективных методов исследования растительного сырья является спектроскопия ядерного магнитного резонанса, которая позволяет выявить особенности структуры и функционального состава лигнинов различных видов растительной биомассы. Однако при использовании этого метода существует ряд ограничений – в частности, регистрация спектров ядерного магнитного резонанса на некоторых ядрах (^{13}C , ^{31}P и др.) обычно требует значительных затрат времени. В данной статье предложен подход к снижению продолжительности записи спектров ядерного магнитного резонанса ^{31}P в 17 раз без потери качества результата. С помощью данного метода и с применением оптимизированных параметров эксперимента проведен функционально-групповой анализ лигнинов некоторых хвойных и лиственных пород, травянистых растений, распространенных на Европейском Севере РФ. Определены типы структурных единиц и характерные для них межструктурные связи в расчете на 100 фенолпропановых единиц методом гетероядерной одноквантовой корреляционной спектроскопии (HSQC) ядерного магнитного резонанса. Выявлены различия функционального состава и особенности структурной организации лигнинов в зависимости от семейства, к которому принадлежит растение. На основе полученного массива экспериментальных данных предложены стратегии переработки конкретных видов растительного сырья. Так, например, лигнины семейств Березовые и Буковые показали наибольшее количество фрагментов β -ариловых эфиров со свободной гидроксильной группой в α -положении, что говорит о большей реакционной способности данных лигнинов. Соответственно, представители этих семейств являются приоритетным сырьем при разработке способов переработки лигнина. В то же время структура лигнинов представителей семейства Буковые оказалась наиболее устойчивой к гидролитической деструкции, что важно для лигнонаправленных концепций биопереработки.

© Сыпалова Ю.А., Шестаков С.Л., Кожевников А.Ю., 2023

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

Ключевые слова: ^{31}P ЯМР, HSQC ЯМР, лигнин, структура лигнина, функциональный состав лигнина, биопереработка, метод ядерного магнитного резонанса

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант 22-13-20015). Работа Сыпаловой Ю.А. поддержана грантом РФФИ для аспирантов (проект № 20-33-90126). Использовано оборудование ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Сыпалова Ю.А., Шестаков С.Л., Кожевников А.Ю. Функциональный состав и структурные особенности лигнинов высших растений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 164–183. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-164-183>

Original article

Functional Composition and Structural Features of Higher Plant Lignins

Yuliya A. Syalova[✉], Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAF-9372-2021](https://orcid.org/0000-0001-7901-6897),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7901-6897>

Semen L. Shestakov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research

Scientist; ResearcherID: [F-5498-2019](https://orcid.org/0000-0001-9057-5577), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9057-5577>

Aleksander Yu. Kozhevnikov, Candidate of Chemistry, Vice director of the Core Facility Center “Arktika” of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov;

ResearcherID: [Q-9555-2016](https://orcid.org/0000-0002-3453-9229), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3453-9229>

Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, Core Facility Center “Arktika”, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; yuliya.popova01@mail.ru[✉], laston85@mail.ru, akozhevnikov@mail.ru

Received on October 10, 2022 / Approved after reviewing on January 14, 2023 / Accepted on January 19, 2023

Abstract. NMR spectroscopy is one of the effective methods for the study of plant raw materials, which makes it possible to identify differences in the structure and functional composition of lignins of various types of plant biomass. However, there are a number of limitations in the use of this method – in particular, the registration of NMR spectra at some nuclei (^{13}C , ^{31}P , etc.) usually requires considerable amount of time. This article proposes an approach to reduce the recording time of ^{31}P NMR spectra by a factor of 17 without losing the quality of the result. With the help of this method and with the use of optimized experimental parameters, the functional group analysis of lignins of some softwood and hardwood species and herbaceous plants distributed in the European North of the Russian Federation was carried out. The types of structural units and their characteristic interstructural relationships per 100 phenylpropane units were determined by HSQC NMR. Differences in the functional composition and features of the structural organization of lignins were identified depending on the family to which the plant belongs. On the basis of the obtained array of experimental data the strategies of processing of specific types of plant raw materials were proposed. For example, lignins of the Birch and Beech families showed the largest number of β -aryl ether fragments with a free hydroxyl group in the α -position, which indicates the greater reactivity of these lignins. Accordingly, representatives of these families are priority raw materials in the development of lignin processing methods. At the same time, the structure of lignins of representatives of the Beech family proved to be the most resistant to hydrolytic degradation, which is important for lignin-directed bioprocessing concepts.

Keywords: ^{31}P NMR, HSQC NMR, lignin, lignin structure, functional composition, bioprocessing, nuclear magnetic resonance method

Acknowledgments: This study was funded by the Russian Science Foundation (Grant project no. 22-13-20015). The work of Yuliya A. Sypalova was supported by the RFBR Grant for Postgraduate Students (Project no. 20-33-90126). The equipment of the Core Facility Center “Arktika” of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov was used.

For citation: Sypalova Yu.A., Shestakov S.L., Kozhevnikov A.Yu. Functional Composition and Structural Features of Higher Plant Lignins. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 164–183. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-164-183>

Введение

В настоящее время общий запас древесины в России составляет около 80 млрд м³. Количество лигнина в растениях колеблется от 15 до 35 % по массе [1, 13, 15]. Благодаря высокой распространенности лигнина в природе его производственный потенциал может достигать ~10 млн т в год, что намного превышает текущий объем рынка продуктов на основе лигнина [12]. Лигнин – ароматический гетерополимер, который находится в клеточной стенке растения вместе с целлюлозой и гемицеллюлозами [8] и обеспечивает жесткость клетки, водонепроницаемость и устойчивость против микробного действия [26]. В основном лигнин получают как отход целлюлозно-бумажной промышленности и затем применяют в качестве топлива для рекуперации энергии [29]. Современные тенденции предполагают комплексное и максимальное использование всех компонентов древесины. Однако такая переработка лигнина ограничена проблемами нерегулярности его строения и сильной модификацией структуры в ходе технологического процесса.

Лигнин представляет собой макромолекулу, состоящую преимущественно из 3 основных мономерных субъединиц: гваяцильные звенья (G) – производные кониферилового спирта, имеющие одну арил-ОСН₃ группу; сирингильные звенья (S) – производные синапового спирта, имеющие две арил-ОСН₃ группы; *n*-гидроксифенильные звенья (H) – не имеют ОСН₃ групп и являются производными *n*-кумарового спирта (рис. 1) [14, 24]. Для макромолекул лигнина характерна поливариантность связей, поэтому однозначно описать макромолекулу лигнина простой комбинацией связей нескольких монолигнолов невозможно [25].

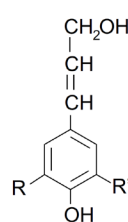
	Заместители	Монолигнол	Тип биомассы
	R = R' = H	<i>n</i> -кумаровый спирт	Травы, компрессионная древесина
	R = H, R' = OCH ₃	Кониферильный спирт	Лиственные и хвойные породы
	R = R' = OCH ₃	Синаповый спирт	Лиственные породы

Рис. 1. Мономерные структурные звенья лигнина

Fig. 1. Monomeric structural units of lignin

Исследование структуры лигнина представляет значительный интерес, как практический (с целью использования лигнина в качестве потенциально-го сырья для более глубокой переработки и получения ценных органических веществ), так и теоретический (например, для изучения путей и особенностей биосинтеза в различных растениях).

Вторичная переработка лигнина должна базироваться на использовании его свойств, обусловленных особенностями строения, наличием и количеством различных функциональных групп, от которых зависят многие полезные свойства конечных продуктов. В связи с этим определение структурных особенностей лигнинов разного происхождения, их функционального состава и продуктов химической модификации лигнинов является актуальным. В наибольшей степени это относится к реакционноспособным гидроксильным группам, которые присутствуют в макромолекуле лигнина в виде заместителей в алифатических цепях, а также в виде фенольных структур гваяцильного, сирингильного и *n*-гидроксифенильного типов [1, 9, 11]. Поэтому знания о точном функциональном составе лигнина необходимы для вовлечения его в процессы вторичной переработки.

Одним из наиболее информативных методов функционального анализа лигнинов является спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [17]. Спектроскопия ^{31}P ЯМР лигнина позволяет количественно определять содержание гидроксильных групп различных типов, в частности алифатических, фенольных, гидроксильных, а также карбоксильных [6]. Метод гетероядерной одноквантовой корреляционной спектроскопии ЯМР (HSQC ЯМР) эффективно используется для более глубокого изучения структуры лигнина и связей в макромолекуле. Совокупность методов ЯМР предоставляет достоверную исчерпывающую информацию о типах единиц и характерных для них межструктурных связях [18, 28].

Лигнины, полученные из различных видов растительной биомассы, обладают специфичными структурными особенностями [7, 23, 27], и для более эффективной переработки лигнина необходимо принимать во внимание видовые различия исходного растительного сырья. Следовательно, формирование единых представлений о структурных особенностях лигнинов разного биологического происхождения необходимо как для подбора комплексных решений для эффективной переработки (биорефайнинга), так и для более глубокого понимания процессов биосинтеза полимеров при росте растений.

Цель настоящего исследования – разработать подход к экспрессному определению функционального состава лигнинов методом ^{31}P ЯМР и изучить структурное разнообразие лигнинов для последующей оптимизации технологий их переработки.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны диоксанлигнины (ДЛ), выделенные из разных видов растительной биомассы: хвойных и лиственных пород и травянистых растений. При этом взяты наиболее распространенные представители растительности Европейского Севера РФ (табл. 1).

Таблица 1

Объекты исследования
Objects of study

Тип растительности	Семейство [2]	Вид	Содержание лигнина Класона, %	Выход ДЛ, % (по Класону)
Хвойные породы	Сосновые	Ель обыкновенная	27,5±0,1	22,2±1,1
		Сосна обыкновенная	29,9±0,7	23,0±1,8
		Пихта сибирская	31,0±0,3	36,4±2,7
Лиственные породы	Березовые	Береза повислая	23,7±0,0	46,8±2,3
		Граб обыкновенный	23,5±0,3	65,1±3,1
		Ольха черная	27,2±0,5	50,7±2,5
	Буковые	Дуб черешчатый	26,9±0,1	44,2±2,6
		Бук европейский	26,4±0,1	50,4±4,5
		Каштан посевной	30,6±0,4	49,0±2,4
	Ивовые	Ива козья	22,1±0,4	46,3±4,1
		Тополь белый	18,1±0,0	38,1±0,9
		Осина обыкновенная	20,7±0,2	54,0±3,2
	Розовые	Малина обыкновенная	24,3±0,0	41,1±2,1
		Рябина обыкновенная	26,2±0,1	37,9±2,3
Яблоня домашняя		23,8±0,6	43,3±3,5	
Травянистые растения	Зонтичные	Тмин обыкновенный	29,0±0,0	14,1±0,7
	Кипрейные	Кипрей узколистный	25,2±0,1	18,7±1,1
	Злаки	Ежа сборная	24,5±0,1	29,4±2,0

Часть образцов отобрана на территории Северо-Западного федерального округа РФ в разных точках Архангельской области (Холмогорский, Красноборский и Шенкурский районы). Дендрологический сад имени И.М. Стратановича в г. Архангельске предоставил образцы лиственных пород деревьев. Для сравнения также были получены дикоросы березы, граба, ольхи, дуба, бука и каштана, произрастающие на территории Краснодарского края. Для репрезентативности растительных проб и объективности информации о содержании основных структурных единиц, входящих в состав лигнина исследуемых пород древесины и травянистых растений, образцы каждого представителя отбирались точно в 3 повторениях и в дальнейшем данные усреднялись.

Средний возраст лиственных деревьев составил 21–38 лет, хвойных – 56–70 лет. В качестве представительного образца древесных растений использовали стволочную часть дерева (торцевой спил толщиной 3–4 см). При взятии образцов малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) выбирали одревесневшие 2-летние ветки и срезали их среднюю часть. При отборе проб травянистых растений извлекали всю надземную часть, листья и цветки удаляли.

Образцы древесины очищали от коры и измельчали в щепу. Ветки малины также зачищали от коры и измельчали. У травянистых растений отделяли стебли. Щепу и стебли высушивали на воздухе и измельчали с использовани-

ем аналитической ножевой мельницы. Влажность воздушно-сухих образцов составляла 3–7 %. Полученные опилки экстрагировали ацетоном в аппарате Сокслета в течение 48 ч для удаления экстрактивных веществ. Все образцы лигнинов выделены по методу Пеппера [21], так как ДЛ считается препаратом, удобным для извлечения и близко отражающим основные структурные особенности природного лигнина. Для извлечения препаратов ДЛ обессмоленные опилки обрабатывали смесью диоксан/вода (объемное соотношение 9:1) при 90 °С в течение 2 ч в токе аргона. Экстракт нейтрализовали NaHCO_3 , затем раствор отфильтровывали и упаривали в 8 раз на ротационном испарителе. Полученный концентрат по каплям приливали в 8-кратный избыток воды. Осажденный ДЛ-сырец отделяли от раствора центрифугированием и высушивали в вакуумном шкафу. Очистку от примесей проводили путем переосаждения в диэтиловый эфир.

Следует отметить, что ДЛ не является абсолютно нативным и претерпевает изменения в процессе выделения. Тем не менее, так как все образцы лигнина выделены по одной методике, их сравнение корректно и может экстраполироваться на исходные лигнины изучаемых видов. Поэтому при интерпретации результатов структурного анализа необходимо учитывать деструкцию лигнина в ходе ацидолиза.

С целью характеристики исследуемых образцов ДЛ получены данные о молекулярно-массовом распределении (среднемассовые M_w и среднечисловые M_n молекулярные массы, индекс полидисперсности M_w/M_n), а также об элементном составе (табл. 2). Молекулярные массы выделенных препаратов лигнина и степень полидисперсности определяли методом эксклюзионной хроматографии с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии системы LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония) со спектрофотометрическим детектором SPD-20A. Элементный состав ДЛ устанавливали с помощью элементного (CHNS) анализатора EA-3000 (EuroVector, Италия). Содержание кислорода рассчитывали, принимая суммарное содержание С, Н, N, S, O равным 100 %.

Основным аналитическим оборудованием, использованным в данной работе, является импульсный ЯМР-спектрометр AVANCE III™ 600 (Bruker, Германия) с рабочей частотой для протонов 600 МГц. Для анализа лигнинов методом ^{31}P ЯМР применен подход, предусматривающий фосфитилирование гидроксильных групп лигнина специальным агентом с последующим получением спектров на ядрах ^{31}P [3–5, 16, 19, 22]. В качестве фосфитилирующего агента использован 2-хлор-4,4,5,5-тетраметил-1,3,2-диоксафосфофан (ТМДР). Спектры регистрировали посредством стандартной 1-импульсной последовательности с длительностью импульса 12 мкс, задержку между импульсами варьировали от 25 до 5 с, число накоплений – от 512 до 128. Массу навески образца изменяли от 15 до 40 мг. Спектры калибровали по сигналу продукта реакции фосфитилирующего агента с водой (химический сдвиг – 132,2 м.д.). Базовую линию корректировали вручную с использованием полиномиальной функции. Отношение «сигнал/шум» измеряли с помощью программного обеспечения спектрометра TopSpin 3.2.

Таблица 2

Характеристика исследуемых препаратов ДЛ
Characteristics of the studied DLs

Семейство	Вид	Элементный состав, %			Молекулярно-массовые характеристики		
		С	Н	О	M_w , Да	M_n , Да	M_w/M_n
Сосновые	Ель	63,0±0,1	5,93±0,4	31,1±0,7	2900	1600	1,8
	Пихта	63,5±0,3	5,71±0,5	30,8±0,7	7000	2100	3,2
	Сосна	62,6±0,3	5,74±0,6	31,7±0,4	4400	1600	2,7
Березовые	Береза	59,5±0,1	5,79±0,7	34,7±0,8	4900	2400	2,0
	Граб	59,3±0,9	5,75±0,4	35,0±0,9	5200	3000	1,7
	Ольха	60,1±0,3	5,94±0,7	34,0±0,8	5800	1800	3,2
Буковые	Дуб	58,4±0,4	6,11±0,3	35,5±0,3	5700	2100	2,7
	Бук	60,1±0,1	5,89±0,3	34,0±0,7	4100	1750	2,3
	Каштан	57,7±0,2	5,89±0,5	36,4±0,3	4400	1300	3,4
Ивовые	Ива	59,4±0,4	5,89±0,5	34,7±0,2	1300	910	1,4
	Тополь	59,8±0,5	5,93±0,6	34,3±0,5	1300	930	1,3
	Осина	54,4±0,0	5,68±0,9	39,9±0,9	1200	880	1,4
Розовые	Малина	58,6±0,1	5,89±0,7	35,5±0,7	5100	1900	2,7
	Рябина	57,9±0,2	5,86±0,2	36,2±1,1	4600	1800	2,5
	Яблоня	57,1±0,6	5,97±0,3	36,9±1,3	4300	1930	2,2
Зонтичные	Тмин	60,0±1,2	5,83±0,4	34,2±0,9	2900	1600	1,8
Кипрейные	Кипрей	58,4±0,9	5,48±0,5	36,1±0,9	3600	1800	2,0
Злаки	Ежа	58,9±0,4	5,55±0,1	35,6±0,8	2100	1300	1,6

В экспериментах HSQC ЯМР в качестве растворителя лигнина использовали дейтерированный диметилсульфоксид (DMCO-d6). Навеску лигнина 70–80 мг растворяли в 600 мкл DMCO-d6 и тщательно перемешивали. Раствор переносили в ампулу для ЯМР-анализа. Содержание основных типов связей в лигнине определяли полуколичественным методом, основанным на интегрировании соответствующих сигналов на спектрах HSQC. Отнесение сигналов на спектрах проводили путем сравнения экспериментальных химических сдвигов с данными научной литературы.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных элементного состава (табл. 2) показал, что ДЛ хвойных пород обладают большим содержанием углерода в составе, но меньшим содержанием кислорода по сравнению с остальными образцами. Пониженное содержание кислорода можно объяснить тем, что лигнины хвойных пород построены преимущественно из гваяцилпропановых структурных единиц, тогда как в лигнинах лиственных и травянистых растений преобладает сингилпропановая структурная единица. Кроме того, лигнины хвойных пород, вероятно всего, более конденсированы, что отражается на значениях содержания углерода и более высоких молекулярных массах.

Представители травянистых растений отличаются низким индексом полидисперсности (табл. 2) и меньшими молекулярными массами. Для ДЛ лиственных пород семейства Ивовые отмечены несколько заниженные значения молекулярных масс по сравнению с остальными рассмотренными ДЛ лиственных пород. Это может быть объяснено тем, что при экстракции в заданных условиях выделяется более низкомолекулярная фракция лигнина и для извлечения препаратов ДЛ из этих пород требуется корректировка методики.

ЯМР-спектроскопия является одним из перспективных методов исследования лигнина в части установления его функционального состава и особенно структур фрагментов, входящих в него. Лигнины разных видов растительной биомассы отличаются по содержанию различных фенилпропановых структур и, следовательно, соответствующих им гидроксильных групп, что приводит к различиям в положении и относительной интенсивности линий спектров ^{31}P ЯМР.

Перед регистрацией основной серии спектров образцов нами произведен подбор параметров эксперимента для оптимизации рабочего процесса. На рис. 2 представлены спектры ^{31}P ЯМР лигнина стеблей малины (*Rubus idaeus* L.), зарегистрированные для одинаковых навески образца (15 мг), длительности импульса (12 мкс) и времени регистрации спада свободной индукции (1,13 с). Варьировали время задержки между импульсами (от 25 до 5 с) и число накоплений (от 512 до 128).

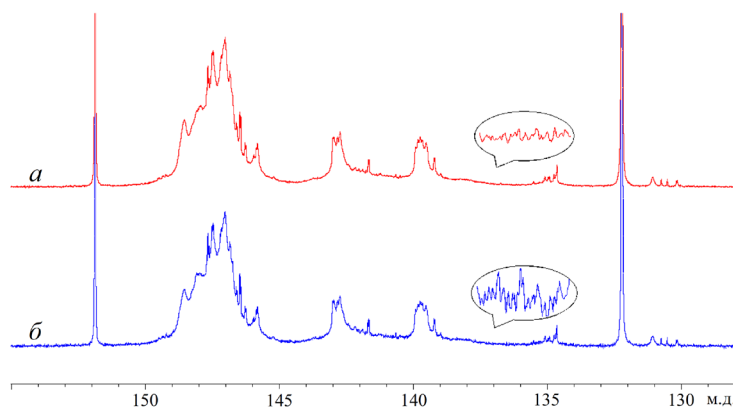


Рис. 2. Спектры ^{31}P ЯМР лигнина стеблей малины, зарегистрированные при различных параметрах: время задержки – 25 с, число накоплений – 512 (а); время задержки – 5 с, число накоплений – 128 (б)

Fig. 2. ^{31}P NMR spectra of raspberry stem lignin recorded at different parameters: delay time – 25 s, number of scans – 512 (a); delay time – 5 s, number of scans – 128 (b)

Результаты эксперимента показывают, что уменьшение времени задержки практически не влияет на совокупность наблюдаемых сигналов спектра. Это позволяет утверждать, что время задержки, равное 5 с, является достаточным для полной релаксации образца после воздействия импульса и регистрации отклика. Дальнейшее снижение времени задержки между импульсами может привести к искажению вида спектра, поскольку время релаксации ядер фосфора составляет 4–10 с.

Также установлено, что отношение «сигнал/шум» лучше в спектре, записанном с бóльшим числом накоплений и длительной задержкой, однако в данном случае время проведения эксперимента (около 3,5 ч) существенно увеличивается по сравнению с экспериментом с короткой задержкой и меньшим числом накоплений (около 13 мин). В основной серии экспериментов было решено использовать короткую задержку и меньшее число накоплений, а отношение «сигнал/шум» улучшить путем увеличения навески образца.

На рис. 3 представлены спектры ^{31}P ЯМР лигнина стеблей малины (*Rubus idaeus* L.), зарегистрированные в одинаковых условиях эксперимента (длительность импульса – 12 мкс; время регистрации спада свободной индукции – 1,13 с; задержка между импульсами – 5 с; число накоплений – 128), но с разной навеской образца (от 15 до 40 мг). Установлено, что при навеске образца 40 мг и числе накоплений 128 отношение «сигнал/шум» достигает значений, получаемых в эксперименте с навеской 15 мг и числом накоплений 512. В итоге в основной серии экспериментов было решено использовать навески образцов в 40 мг.

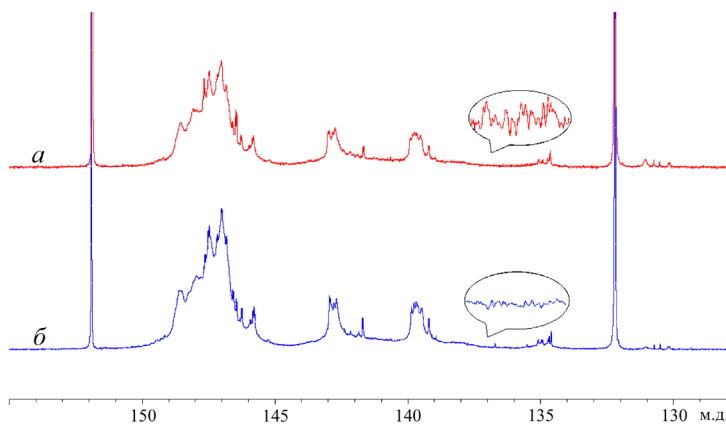


Рис. 3. Спектры ^{31}P ЯМР лигнина стеблей малины для различных навесок образца: 15 (а) и 40 (б) мг

Fig. 3. ^{31}P NMR spectra of raspberry stem lignin registered for different sample weights: 15 mg (a) и 40 mg (b)

Таким образом, в результате предварительных экспериментов нами определены параметры регистрации спектров, которые использовались в основной серии опытов: длительность импульса – 12 мкс; задержка между импульсами – 5 с; число накоплений – 128; масса навески – 40 мг.

Оптимизация параметров регистрации спектров ^{31}P ЯМР позволила снизить время записи одного спектра с изначальных 3 ч 43 мин до 13 мин без потери качества результата, что подтверждается вычислением отношения «сигнал/шум» в спектрах, зарегистрированных при разных параметрах. Измерения амплитуды сигнала и шума во всех спектрах проводили в диапазонах 134,82–134,44 м.д. для сигнала (соответствующего карбоксильным группам) и 134,0–133,0 м.д. для шума. Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Определение отношения «сигнал/шум» в экспериментах
Signal-to-noise ratio in experiments

Навеска, мг	Задержка, с	Отношение «сигнал/шум»
15	25	41,33
15	5	19,09
40	5	38,03

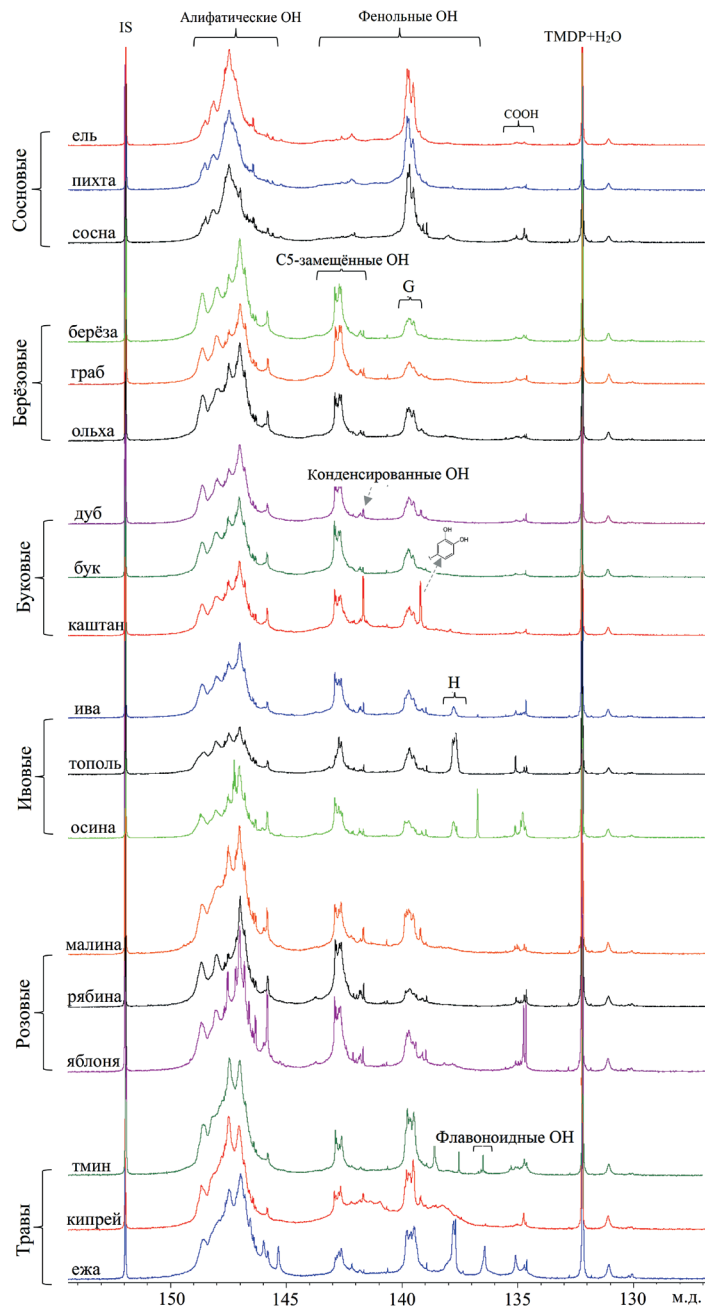
Спектры ^{31}P ЯМР основной серии экспериментов для всех образцов представлены на рис. 4. Анализ спектров показывает следующее. В области $\sim 132,2$ м.д. наблюдается сигнал, соответствующий атому фосфора в составе продукта реакции фосфитилирующего агента с водой, по этому пику производится калибровка всего спектра. В диапазоне химических сдвигов $\sim 152,0$ м.д. проявляется сигнал, отвечающий гидроксильным группам внутреннего стандарта; $\sim 133,8$ – $136,1$ м.д. – сигналы, соответствующие карбоксильным ОН-группам лигнинов; $\sim 138,5$ – $136,8$ м.д. – сигнал *n*-оксифенильных групп; $\sim 138,5$ – $140,3$ м.д. – сигналы гваяцильных ОН-групп; $\sim 140,3$ – $144,9$ м.д. – сигналы ОН-групп, отвечающие С5-замещенным единицам; $\sim 144,9$ – $151,4$ м.д. – сигналы алифатических ОН-групп. Кроме того, на некоторых спектрах, в особенности травянистых растений, зафиксированы сигналы, отвечающие ОН-группам флавоноидных структур. Сигнал в области $\sim 138,4$ – $138,8$ м.д. резонирует от ОН-групп структур пирокатехинового типа, а в области $\sim 136,1$ – $136,8$ м.д. – от структур флороглюцинового типа в составе флавоноидов.

Обнаружено, что спектры ^{31}P ЯМР лигнинов различных растений неодинаковы по относительной интенсивности сигналов в указанных выше диапазонах. Таким образом, мы можем наблюдать различие функционального состава лигнинов в зависимости от семейства, к которому принадлежит растение, с помощью спектроскопии ЯМР.

Из спектров ^{31}P ЯМР ДЛ хвойных пород видно, что наибольшую интенсивность среди сигналов фенольных гидроксильных групп имеют сигналы, соответствующие гваяцильным ОН-группам (~ 139 – 140 м.д.). В то же время сигналы, отвечающие С5-замещенным ОН-группам, практически отсутствуют в спектрах, что подтверждают литературные данные [6,19, 23].

Спектры ^{31}P ЯМР ДЛ, выделенных из древесных растений семейства Ивовые, показывают значительное количество Н-единиц (область на спектре ~ 137 – 138 м.д.) в отличие от лигнинов других рассмотренных лиственных пород деревьев.

Для лигнинов, полученных из древесных растений семейств Розовые и Буковые, характерно преобладание С5-замещенных структурных звеньев в составе. Группы сигналов, соответствующих ОН-группам в гваяцилпропановых звеньях, менее выражены в спектрах, чем у спектров лигнинов других лиственных пород деревьев. Интенсивности сигнала алифатических ОН-групп в области ~ 146 м.д. на спектрах семейств Березовые и Розовые увеличены по сравнению с аналогичными сигналами в спектрах остальных проанализированных образцов.

Рис. 4. Сравнительный анализ спектров ^{31}P ЯМР ДЛFig. 4. Comparative analysis of ^{31}P NMR DL spectra

В отличие от лигнинов, выделенных из древесины, лигнины трав содержат в заметных количествах все типы гидроксильных групп, распространенных в лигнинах. Помимо этого, на спектрах наблюдается сигнал в области $\sim 136,4$ м.д., который не отвечает ни одной из распространенных функциональных ОН-групп лигнинов. Этот сигнал относится к ОН-группам флавоноидов, однако механизм включения этих фрагментов в структуру лигнина до конца не выяснен.

Таблица 4

Содержание функциональных ОН-групп, ммоль/г, в исследованных ДЛ по данным спектроскопии ³¹P ЯМР
Content of functional OH-groups in the studied DL according to ³¹P NMR spectroscopy data

Семейство	Вид	Функциональные ОН-группы										Всего	
		Алифатические	C5-замещенные	G	H	COOH	Флавоноидные	Фенольные					
Сосновые	Ель	4,39±0,09	0,68±0,01	1,54±0,04	0,06±0,00	0,08±0,00	–	2,28±0,05	6,75±0,14				
	Пихта	3,59±0,11	0,73±0,02	1,38±0,01	0,08±0,00	0,08±0,00	–	2,19±0,03	5,86±0,14				
	Сосна	3,55±0,10	0,55±0,00	1,48±0,02	0,14±0,02	0,21±0,03	–	2,18±0,04	5,94±0,17				
Березовые	Береза	4,62±0,17	1,29±0,03	0,47±0,01	0,09±0,01	0,14±0,01	–	1,85±0,05	6,61±0,23				
	Граб	3,89±0,18	1,64±0,01	0,52±0,01	0,18±0,01	0,17±0,01	–	2,34±0,03	6,40±0,22				
	Ольха	4,75±0,23	1,21±0,04	0,68±0,02	0,14±0,00	0,13±0,00	–	2,03±0,06	6,91±0,29				
Буковые	Дуб	3,91±0,12	1,26±0,01	0,58±0,01	0,09±0,00	0,12±0,01	–	1,92±0,02	5,94±0,15				
	Бук	4,09±0,15	1,35±0,01	0,64±0,01	0,08±0,01	0,08±0,00	–	2,07±0,03	6,24±0,18				
	Каштан	3,70±0,20	1,73±0,05	0,76±0,02	0,18±0,02	0,13±0,00	–	2,67±0,09	6,50±0,29				
Ивовые	Ива	3,62±0,11	1,15±0,01	0,59±0,01	0,13±0,01	0,14±0,01	–	1,86±0,03	5,63±0,15				
	Тополь	3,62±0,05	1,00±0,00	0,65±0,01	0,65±0,05	0,13±0,01	–	2,30±0,06	6,05±0,12				
	Осина	3,88±0,09	1,12±0,00	0,46±0,01	0,18±0,01	0,37±0,05	–	1,76±0,02	6,01±0,16				
Розовые	Малина	4,28±0,13	1,14±0,01	0,69±0,02	0,15±0,01	0,14±0,01	–	1,99±0,04	6,42±0,18				
	Рябина	3,60±0,12	1,40±0,03	0,35±0,00	0,07±0,00	0,14±0,01	–	1,82±0,03	5,57±0,16				
	Яблоня	4,15±0,13	1,19±0,01	0,65±0,02	0,16±0,02	0,23±0,03	–	2,00±0,05	6,38±0,21				
Травы	Тмин	4,34±0,21	0,80±0,02	0,96±0,04	0,10±0,01	0,20±0,03	0,05±0,00	1,91±0,07	6,45±0,30				
	Кипрей	3,75±0,14	1,85±0,05	1,15±0,03	0,48±0,05	0,13±0,01	0,06±0,00	3,53±0,13	7,42±0,28				
	Ежа	3,84±0,16	0,73±0,01	0,75±0,01	0,47±0,05	0,25±0,05	0,20±0,03	2,16±0,07	6,25±0,31				

Общее содержание гидроксильных групп, в частности свободных фенольных, преобладает в ДЛ травянистых растений. Это объясняется значительным количеством Н-единиц в структуре, а также вкладом фрагментов флавоноидов. Содержание карбоксильных ОН-групп на уровне 0,2 ммоль/г в травянистых лигнинах говорит о том, что такие лигнины склонны к окислению и требуют более мягких условий извлечения.

Преобладание свободных алифатических ОН-групп в структуре лигнина благоприятствует гидротропным процессам биопереработки при производстве формованных материалов на основе лигнина [15]. Для такой стратегии наиболее подходящими породами древесины являются ель, береза и ольха.

Высокая доля фенольных ОН-групп способствует максимизации конверсии лигнина в биополиолы в одну стадию для прямого производства пенополиуретанов [10]. Необходимыми характеристиками обладают травянистые растения, а также ель и каштан.

Низкомолекулярные травянистые лигнины с *n*-гидроксифенильными группами в структуре (кипрей, ежа) потенциально пригодны для получения свободных фенолов. Удаление *n*-гидроксикоричного спирта и коричневого альдегида из структуры лигнина в условиях кислотного катализа позволит использовать такие модифицированные лигнины, как антиоксиданты, углеродное волокно, наночастицы или сорбенты, для очистки воды [20].

Таким образом, в силу различия функциональных групп лигнина области его применения охватывают широкий спектр, включая производство энергии, биотоплива и продуктов синтез-газа, получение полимерных производных лигнина: пластмасс, полимерных пен, клеев, добавок в биоразлагаемые композиты, мембран и углеродных волокон, антиоксидантов и противомикробных агентов.

Метод HSQC ЯМР является наиболее часто применяемым методом ЯМР спектроскопии для характеристики лигнинов, поскольку предоставляет достоверную исчерпывающую информацию о типах единиц и характерных химических связях между фенилпропановыми единицами (ФПЕ). Молекулярная геометрия основных структур, как области боковой цепи, так и ароматической области, изображена на рис. 5.

В табл. 5 представлены результаты количественного анализа основных типов связей, характерных для всех исследуемых препаратов лигнина.

Анализ полученных данных показывает, что содержание основных мономерных звеньев (S-, G- и H-единиц), а также метоксильных групп в целом соответствует литературным данным. В то же время данные количественного анализа β -O-4-связей сильно разнятся [7]. Это объясняется тем, что в литературе сигнал при $\delta_{\text{C}}/\delta_{\text{H}}$ 73,7–69,7/5,26–4,65 ошибочно приравнивают к общему содержанию всех β -O-4-связей, тогда как данный сигнал принадлежит только структурам β -ариловых эфиров со свободной гидроксильной группой в α -положении.

Так, препараты ДЛ семейства Сосновые состоят преимущественно из G-единиц с незначительным присутствием S- и H-единиц. Это подтверждается и количеством метоксильных групп – ~ 95 %. Кроме того, содержание β -O-4-связей со свободными бензильными ОН-группами (β -O-4/ α -ОН) для семейства Сосновые наименьшее из всех рассмотренных препаратов.

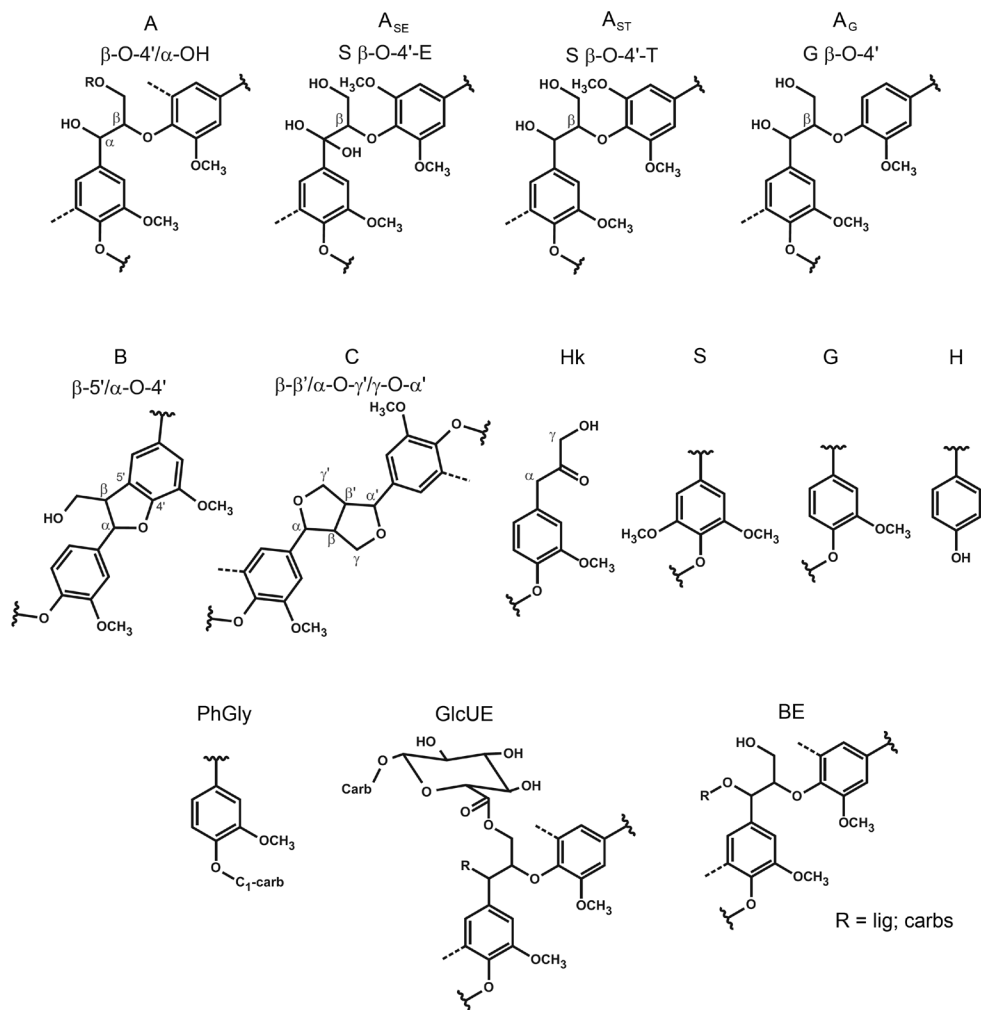


Рис. 5. Основные структурные фрагменты, присутствующие в ДЛ: А – β -ариловые эфиры; A_{SE} – эритро-изомеры; A_{ST} – трео-изомеры β -ариловых эфиров S-типа; A_G – β -ариловые эфиры G-типа; В – фенолкупрановые структуры, образованные β -5'/ α -O-4'-связями; С – структуры резинола, образованные β - β' / α -O- γ' / γ -O- α' -связями; Hk – кетоны Гибберта; S – сирингильная единица; G – гваяцильная единица; H – *p*-гидроксифенильная единица; PhGly – фенолгликозидная связь; GlcUE – сложные эфиры глюконовой кислоты; BE – бензиловые эфиры

Fig. 5. Main structures present in DLs: A – β -aryl ethers; A_{SE} – erythro-isomers; A_{ST} – S-type β -aryl ethers treo-isomers; A_G – G-type β -aryl ethers; B – phenylcoumarane structures formed by β -5'/ α -O-4' bonds; C – resinol structures formed by β - β' / α -O- γ' / γ -O- α' bonds; Hk – Hibbert's ketones; S – syringyl unit; G – guaiacyl unit; H – *p*-hydroxyphenyl unit; PhGly – phenylglycoside bond; GlcUE – glucuronic acid ethers; BE – benzyl ethers

Присутствие во всех препаратах фрагментов кетонов Гибберта указывает на то, что часть β -O-4-связей подверглась гидролитической деструкции в ходе ацидолиза. Количество структур Hk для большинства исследованных образцов составило порядка 4–6 на 100 ФПЕ, исключая лигнины представителей семейства Буковые (1–2 на 100 ФПЕ), что говорит о более устойчивой структуре лигнинов данного семейства.

Таблица 5

Количество различных структурных фрагментов ДЛ по данным HSQC ЯМР, на 100 ФПЕ
Quantification of various structural fragments of DLs according to HSQC NMR data, per 100 PPU

Фрагмент	Образец лигнина															
	Сосновые				Березовые				Буковые							
	Ель	Пихта	Сосна	Береза	Граб	Ольха	Дуб	Бук	Каштан	Сосна	Береза	Граб	Ольха	Дуб	Бук	Каштан
S _{2,6}	3,6±0,1	4,6±0,2	4,5±0,1	71,9±1,8	75,8±2,1	62,9±1,3	67,5±1,5	65,0±2,0	62,4±2,2							
G ₂	96,0±3,9	95,0±2,7	87,0±3,3	28,1±0,5	24,2±0,2	37,1±0,9	32,5±1,0	35,0±2,0	37,6±1,8							
H _{2,6}	0,8±0,2	0,9±0,1	1,5±0,0	1,5±0,1	1,9±0,1	1,5±0,0	0,7±0,1	0,8±0,1	0,8±0,3							
S/G	0,0	0,0	0,0	2,6±0,1	3,1±0,1	1,7±0,1	2,1±0,1	1,9±0,2	1,7±0,1							
OMe	98,1±3,2	92,4±1,8	93,6±2,5	116,4±3,7	109,7±1,3	110,9±2,2	129,1±5,0	109,2±2,9	122,7±3,7							
β-O-4/α-OH	16,6±0,6	13,9±0,5	12,2±1,0	28,4±0,3	33,6±0,7	36,4±0,5	33,3±0,9	24,3±0,5	33,8±0,2							
S β-O-4 T	2,7±0,1	1,7±0,5	1,5±0,1	13,5±0,5	15,5±1,0	15,3±1,4	13,8±0,5	10,0±0,9	14,4±0,1							
S β-O-4 E	1,4±0,4	1,2±0,1	1,1±0,1	6,8±0,2	8,0±0,5	8,0±0,2	7,8±0,8	5,7±0,5	7,6±0,1							
G β-O-4 E+T	12,0±1,0	9,3±0,5	8,2±0,9	7,5±0,5	8,1±0,1	10,4±0,4	8,5±0,3	7,2±0,4	9,3±0,2							
α-CO/β-O-4	0,1±0,0	0,2±0,1	0,2±0,2	0,8±0,1	1,4±0,0	1,2±0,1	1,3±0,0	0,9±0,1	1,2±0,0							
β-β (резинол)	3,5±0,2	3,5±0,0	2,6±0,1	7,8±0,3	6,4±0,5	7,3±0,2	7,4±0,1	8,1±0,3	7,6±0,1							
β-5 (фенилкумаран)	9,3±0,2	8,3±0,2	7,6±0,3	2,2±0,2	2,3±0,1	4,1±0,1	9,1±0,7	2,8±0,4	3,5±0,0							
Hк	5,2±0,1	5,8±0,0	5,5±0,6	6,0±0,5	4,2±0,2	6,3±0,4	1,0±0,0	1,4±0,1	2,2±0,1							
Ar-CH-CH-CHO	1,2±0,1	1,0±0,1	1,2±0,0	1,2±0,0	1,1±0,0	1,4±0,0	1,3±0,1	1,0±0,1	1,2±0,0							
Ar-CHO	0,3±0,0	0,4±0,1	1,0±0,1	0,4±0,0	0,4±0,0	0,4±0,0	0,2±0,0	0,2±0,2	0,7±0,1							
Ac	0,3±0,0	0,4±0,0	0,8±0,0	1,7±0,1	3,0±0,5	2,0±0,1	3,1±0,1	1,2±0,1	2,7±0,3							
γ-эфиры	0,2±0,0	0,5±0,5	0,5±0,1	1,3±0,1	0,3±0,1	0,8±0,1	0,7±0,0	1,0±0,0	2,7±0,1							
BE	6,0±0,9	6,0±0,7	4,7±0,5	4,6±0,3	5,4±0,1	6,2±0,5	5,8±0,2	5,9±0,9	0,8±0,1							
GlcU	0,2±0,2	0,2±0,0	0,2±0,0	0,3±0,2	0,3±0,0	0,2±0,0	0,2±0,2	0,2±0,0	0,4±0,0							
PhGly	0,9±0,1	1,1±0,0	1,1±0,1	1,4±0,0	1,7±0,3	1,6±0,1	1,3±0,1	1,4±0,1	1,4±0,0							

Продолжение табл. 5

Фрагмент	Образец лигнина											
	Ивовые				Розовые				Травы			
	Ива	Тополь	Осина	Малына	Рябина	Яблоня	Тмин	Кипрей	Ежа			
S _{2,6}	60,3±0,9	55,3±1,0	66,6±2,1	56,0±1,8	76,0±1,3	67,0±0,5	42,3±1,2	35,5±0,7	43,5±0,5			
G ₂	39,7±0,5	44,7±0,7	33,4±0,2	44,0±1,8	24,0±0,6	31,9±1,0	56,6±1,8	63,4±2,2	53,3±0,9			
H _{2,6}	0,7±0,1	1,7±0,2	0,8±0,1	1,0±0,2	0,6±0,0	2,1±0,1	2,4±0,2	2,3±0,1	6,4±0,2			
S/G	1,5±0,0	1,2±0,0	2,0±0,1	1,3±0,1	3,2±0,1	2,1±0,1	0,7±0,0	0,6±0,0	0,8±0,0			
OMe	109,3±3,1	104,5±2,2	105,3±0,5	89,3±2,9	121,0±3,2	111,9±0,4	92,1±0,5	77,3±0,1	92,1±0,7			
β-O-4/α-OH	23,9±0,7	26,5±0,5	21,5±0,1	36,5±0,5	26,1±0,4	24,7±0,1	26,2±0,2	27,0±0,5	24,2±0,4			
S β-O-4 T	9,6±0,2	7,7±0,1	9,3±0,2	14,9±0,6	12,0±0,5	10,4±0,2	9,4±0,1	9,0±0,1	7,9±0,1			
S β-O-4 E	5,6±0,1	5,4±0,4	5,2±0,0	10,1±0,4	7,2±0,2	6,8±0,0	5,6±0,4	5,3±0,0	5,0±0,0			
G β-O-4 E+T	7,1±0,0	8,8±0,1	8,4±0,9	12,3±1,3	5,2±0,1	6,4±0,1	9,4±0,3	9,6±0,1	7,3±0,1			
α-CO/β-O-4	0,8±0,0	0,5±0,0	0,4±0,0	0,3±0,0	1,0±0,0	0,9±0,0	0,7±0,0	0,4±0,0	2,3±0,0			
β-β (резинол)	7,5±0,2	4,1±0,1	6,7±0,1	8,5±0,6	7,1±0,1	6,9±0,7	8,1±0,1	6,9±0,2	3,6±0,1			
β-5 (фенилкумаран)	3,2±0,1	3,7±0,0	2,2±0,0	4,5±0,1	1,2±0,0	2,5±0,1	5,9±0,2	6,4±0,1	4,8±0,2			
Hk	6,6±0,5	4,8±0,2	2,1±0,0	3,4±0,1	0,9±0,0	6,3±0,2	5,1±0,1	4,4±0,0	4,2±0,0			
Ar-CN=CH-CHO	1,1±0,0	1,2±0,1	1,2±0,1	1,1±0,0	1,0±0,0	1,3±0,0	1,2±0,0	0,8±0,0	0,5±0,0			
Ar-CHO	0,9±0,1	0,6±0,0	0,6±0,0	0,3±0,0	0,6±0,0	0,6±0,0	0,3±0,0	0,3±0,0	0,4±0,0			
Ac	0,8±0,0	0,6±0,1	2,4±0,3	2,5±0,1	1,6±0,1	3,7±0,1	1,0±0,1	1,4±0,1	1,5±0,1			
γ-эфирь	1,2±0,0	6,6±0,4	3,1±0,0	0,5±0,5	1,0±0,0	1,3±0,0	1,9±0,1	1,6±0,1	5,9±0,3			
BE	5,2±0,1	6,7±0,2	4,3±0,1	3,8±0,2	4,6±0,2	4,3±0,3	4,5±0,2	4,1±0,3	4,3±0,1			
GlcU	0,1±0,0	0,3±0,0	0,1±0,0	0,3±0,2	0,1±0,1	0,1±0,0	0,4±0,2	0,5±0,0	0,5±0,1			
PbGly	1,1±0,0	0,8±0,1	2,6±0,0	1,1±0,1	1,6±0,1	2,0±0,1	0,8±0,0	0,3±0,0	6,3±0,2			

Для всех препаратов ДЛ количество *трео*-изомеров β -ариловых эфиров S-типа вдвое больше, чем *эритро*-изомеров, что объясняется стерическими особенностями.

Количество структур резинола для ДЛ из хвойных пород, втрое меньше, чем структур фенилкумарана, тогда как для ДЛ из лиственных пород, наоборот, структур резинола втрое больше, чем структур фенилкумарана. Для ДЛ травянистых растений количество этих структур примерно одинаковое.

Наличие типов связей, характерных для лигноуглеводного комплекса отмечено у всех исследуемых препаратов ДЛ. Наибольшую долю связей «лигнин–углевод» составляют бензиловые эфиры, в которых остаток полисахарида связан с лигнином через α -положение. Количество бензил-эфирных связей варьировало в диапазоне 3,8–6,7 на 100 ФПЕ. Отмечены также следовые количества сложных эфиров глюкуроновой кислоты. Наибольшее содержание фенил-гликозидных связей зафиксировано для ДЛ ежи (6,3 на 100 ФПЕ). Присутствие некоторого количества остаточных связей лигнина с углеводами характерно для препаратов ДЛ, так как условия ацидолиза считаются относительно мягкими и полной деструкции лигноуглеводного комплекса не происходит.

Соотношение S- и G-единиц сильно варьирует в лигнинах различных пород древесины, что влияет на реакционную способность лигнина. Как правило, лигнин, обладающий большим количеством S-единиц, рассматривается как более предпочтительное сырье для максимизации выхода мономеров при биоконверсии, так как высокое отношение S/G может уменьшить образование неактивных связей C-C, приводящих к нежелательной конденсации лигнина во время деполимеризации. Так, для лиственных пород S/G = 1,5–3,2, тогда как для хвойных пород и травянистых растений S/G = 0,0–0,5. Анализируя соотношение S/G единиц различных лигнинов, можно увидеть, что большинство рассмотренных лигнинов лиственных пород потенциально удобны для последующей переработки. В этом аспекте лигнины трав являются менее перспективным сырьем.

Заключение

Предложен подход к экспрессной записи спектров ядерного магнитного резонанса ^{31}P для исследования функционального состава лигнинов. Метод предусматривает фосфитилирование гидроксильных групп лигнина специальным агентом с последующим получением спектров на ядрах фосфора. Предложено увеличение массы исследуемого образца до 40 мг. При записи спектра используется одноимпульсная последовательность с длительностью импульса 12 мкс, задержка между импульсами равна 5 с, число накоплений – 128. На оптимизированных параметрах время записи одного спектра составляет 13 мин.

Составлен подробный структурный профиль для 18 препаратов диоксанлигнинов, выделенных из растений различного биологического происхождения. Отмечена структурная вариабельность лигнинов не только между разными видами растительной биомассы, но и в зависимости от семейства, к которому принадлежит растение. Профиль включает числовые значения количества функциональных групп, связей и фрагментов изученных лигнинов. Также выведено соотношение мономерных звеньев лигнинов.

Полученный массив структурной информации позволяет проанализировать перспективные способы валоризации лигнина в вопросах комплексного использования всех компонентов биомассы. Так, например, лигнины семейств Березовые и Буковые имеют в структуре наибольшее количество фрагментов β -арильных эфиров со свободной гидроксильной группой в α -положении, что говорит о большей реакционной способности данных лигнинов. Соответственно, представители этих семейств являются приоритетным сырьем при разработке способов переработки лигнина. В то же время структура лигнинов представителей семейства Буковые оказалась наиболее устойчивой к гидролитической деструкции (кетоны Гибберта – $\sim 1\text{--}2$ на 100 ФПЕ), что важно для лигнонаправленной концепции биопереработки. Соотношение сирингильных/гваяцильных звеньев для лигнинов лиственных пород составило от 1,5 до 3,2 ед., что свидетельствует о высоком потенциале данных лигнинов для последующей переработки. Лигнины трав привлекательны для получения фенолов. Таким образом, выбор исходного сырья для биопереработки зависит от заданных свойств конечных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боголицын К.Г., Лунин В.В., Косяков Д.С., Карманова А.П., Скребец Т.Э., Попова Н.Р., Малков А.В., Горбова Н.С., Пряхин А.Н., Шкаев А.Н., Иванченко Н.Л. Физическая химия лигнина / под ред. К.Г. Боголицына и В.В. Лунина. М.: Академкнига, 2010. 489 с. Bogolitsyn K.G. *Physical Chemistry of Lignin*. Moscow, Akademkniga Publ., 2010. 489 p. (In Russ.)
2. Плантариум: Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений, 2007–2022. Режим доступа: <http://www.plantarium.ru> (дата обращения: 03.08.22). Plantarium. *Plants and Lichens of Russia and Neighboring Countries: Open Online Galleries and Plant Identification Guide*. 2007–2022.
3. Попова Ю.А., Шестаков С.Л., Кожевников А.Ю., Косяков Д.С., Сыпалов С.А. Сравнительный анализ лигнинов различных растительных форм с применением спектроскопии ^{31}P -ЯМР // Химия растит. сырья. 2019. № 4. С. 57–64. Popova Yu.A., Shestakov S.L., Kozhevnikov A.Yu., Kosyakov D.S., Sypalov S.A. Comparative Analysis of Lignins of Various Plant Forms by ^{31}P -NMR. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2019, no. 4, pp. 57–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019045119>
4. Шестаков С.Л., Косяков Д.С., Кожевников А.Ю., Ульяновский Н.В., Попова Ю.А. Совершенствование методики определения гидроксильных групп лигнина методом ЯМР-спектроскопии // Химия растит. сырья. 2017. № 2. С. 81–88. Shestakov S.L., Kosyakov D.S., Kozhevnikov A.Yu., Ulyanovskiy N.V., Popova Yu.A. The Elaboration of NMR Analysis of Different Types of Hydroxyl groups in the Lignin Samples. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of plant raw material, 2017, no. 2, pp. 81–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017021641>
5. Argyropoulos D.S. Quantitative Phosphorus-31 NMR Analysis of Lignins, a New Tool for the Lignin Chemist. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 1994, vol. 14, iss. 1, pp. 45–63.
6. Balakshin M.Yu., Capanema E.A. On the Quantification of Lignin Hydroxyl Groups with ^{31}P and ^{13}C NMR Spectroscopy. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2015, vol. 35, iss. 3, pp. 220–237. <https://doi.org/10.1080/02773813.2014.928328>

7. Balakshin M.Y., Capanema E.A., Santos R.B., Chang H.M., Jameel H. Structural Analysis of Hardwood Native Lignins by Quantitative ^{13}C NMR Spectroscopy. *Holzforschung*, 2015, vol. 70, iss. 2, pp. 95–108. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0328>
8. Boerjan W., Ralph J., Baucher M. Lignin Biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, vol. 54, iss. 1, pp. 519–546. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>
9. Chakar F.S., Ragauskas A.J. Review of Current and Future Softwood Kraft Lignin Process Chemistry. *Industrial Crops and Products*, 2004, vol. 20, iss. 2, pp. 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.016>
10. Duval A., Vidal D., Sarbu A., Rene W., Averous L. Scalable Single-step Synthesis of Lignin-based Liquid Polyols with Ethylene Carbonate for Polyurethane Foams. *Materials Today Chemistry*, 2022, vol. 24, art. no. 100793. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.100793>
11. El Mansouri N.E., Salvado J. Analytical Methods for Determining Functional Groups in Various Technical Lignins. *Industrial Crops and Products*, 2007, vol. 26, iss. 2, pp. 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.02.006>
12. FAOSTAT Database: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016–2022. Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (accessed 03.08.22).
13. Fițișău I.F., Peter F., Boeriu C.G. Structural Analysis of Lignins from Different Sources. *International Journal of Chemical, Materials and Biomolecular Sciences*, 2013, vol. 6, iss. 4, pp. 167–172. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1331679>
14. Freudenberg K., Neish A.C. *Constitution and Biosynthesis of Lignin*. New York, Springer Verlag, 1968. 129 p.
15. Gabov K., Gosseling R.J., Smeds A.I., Fardim P. Characterization of Lignin Extracted from Birch Wood by a Modified Hydrotropic Process. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, vol. 62, iss. 44, pp. 10759–10767. <https://doi.org/10.1021/jf5037728>
16. Granata A., Argyropoulos D.S. 2-Chloro-4,4,5,5-tetramethyl-1,3,2-dioxaphospholane, a Reagent for the Accurate Determination of the Uncondensed and Condensed Phenolic Moieties in Lignins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, vol. 43, iss. 6, pp. 1538–1544. <https://doi.org/10.1021/jf00054a023>
17. Heitner C., Dimmel D.R., Schmidt J.A. *Lignin and Lignans: Advances in Chemistry*. Florida, CRC Press, 2010. 683 p.
18. Jiang B., Zhang Yu, Guo T., Zhao H., Jin Y. Structural Characterization of Lignin and Lignin-carbohydrate Complex (LCC) from Ginkgo Shells (*Ginkgo biloba* L.) by Comprehensive NMR Spectroscopy. *Polymers*, 2018, vol. 10, iss. 7, pp. 736. <https://doi.org/10.3390/polym10070736>
19. Meng X., Crestini C., Ben H., Hao N., Pu Y., Ragauskas A.J., Argyropoulos D.S. Determination of Hydroxyl Groups in Biorefinery Resources via Quantitative ^{31}P NMR Spectroscopy. *Nature Protocols*, 2019, vol. 14, iss. 9, pp. 2627–2647. <https://doi.org/10.1038/s41596-019-0191-1>
20. Paulsen Thoresen P., Lange H., Crestini C., Rova U., Matsakas L., Christakopoulos P. Characterization of Organosolv Birch Lignins: Toward Application-Specific Lignin Production. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 6, pp. 4374–4385. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05719>
21. Pepper J.M., Baylis P.E.T., Adler E. The Isolation and Properties of Lignins Obtained by the Acidolysis of Spruce and Aspen Woods in Dioxane-water Medium. *Canadian Journal of Chemistry*, 1959, vol. 37, iss. 8, pp. 1241–1248. <https://doi.org/10.1139/v59-183>
22. Popova Y.A., Shestakov S.L., Belesov A.V., Pikovskoi I.I., Kozhevnikov A.Y. Comprehensive Analysis of the Chemical Structure of Lignin from Raspberry Stalks (*Rubus idaeus* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 164, pp. 3814–3822. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.240>

23. Pu Y., Cao S., Ragauskas A.J. Application of Quantitative ^{31}P NMR in Biomass Lignin and Biofuel Precursors Characterization. *Energy & Environmental Science*, 2011, vol. 4, iss. 9, pp. 3154–3166. <https://doi.org/10.1039/C1EE01201K>
24. Ralph J., Lundquist K., Brunow G., Lu F., Kim H., Schatz P.F., Boerjan W. Lignins: Natural Polymers from Oxidative Coupling of 4-hydroxyphenyl-propanoids. *Phytochemistry Reviews*, 2004, vol. 3, iss. 1, pp. 29–60. <https://doi.org/10.1023/B:PHYT.0000047809.65444.a4>
25. Vanholme R., Demedts B., Morreel K., Ralph J., Boerjan W. Lignin Biosynthesis and Structure. *Plant physiology*, 2010, vol. 153, iss. 3, pp. 895–905. <https://doi.org/10.1104/pp.110.155119>
26. Weng J.K., Chapple C. The Origin and Evolution of Lignin Biosynthesis. *New Phytologist*, 2010, vol. 187, iss. 2, pp. 273–285. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03327.x>
27. Wyman C. *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization*. Washington, Routledge, 1996. 444 p.
28. Xu G., Shi Z., Zhao Y., Deng J., Dong M., Liu C., Murugadoss V., Mai X., Guo Z. Structural Characterization of Lignin and its Carbohydrate Complexes Isolated from Bamboo (*Dendrocalamus sinicus*). *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 126, pp. 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.234>
29. Yuan T.Q., Xu F., Sun R.C. Role of Lignin in a Biorefinery: Separation Characterization and Valorization. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2013, vol. 88, iss. 3, pp. 346–352. <https://doi.org/10.1002/jctb.3996>

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

Научная статья

УДК 676.017

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-184-194

Зольность тарного картона. Проблемы и пути их решения

Д.Н. Жирнов¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [HKE-0109-2023](https://orcid.org/0000-0003-4243-3536),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-3536>

Е.В. Дернова², канд. техн. наук; ResearcherID: [HKE-0047-2023](https://orcid.org/0000-0002-7869-9646),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-9646>

В.В. Гораздова^{2✉}, канд. техн. наук; ResearcherID: [GWC-4729-2022](https://orcid.org/0000-0003-4732-7791),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4732-7791>

Д.А. Дулькин², д-р техн. наук; ResearcherID: [HKD-9977-2023](https://orcid.org/0000-0001-6517-2979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6517-2979>

¹ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат», пл. Печаткина, д. 4, г. Сокол, Вологодская обл., Россия, 162135; zhirnov@suhona.com

²ООО «Управляющая компания “Объединенные бумажные фабрики”», Киевское шос., 22-й км, д. 4, стр. 1, блок Б, поселение Московский, Москва, Россия, 108811; edernova@ukobf.com, vgorazdova@ukobf.com[✉], ddulkin@ukobf.com

Поступила в редакцию 19.01.23 / Одобрена после рецензирования 11.04.23 / Принята к печати 16.04.23

Аннотация. Исследована природа зольности тарного картона из макулатуры, а также фракционный состав золы. С ростом использования макулатурного картона с белым покровным слоем и ухудшением условий сбора и хранения макулатуры на заготовительных площадках происходит увеличение размеров минеральных загрязнений в поступающей на переработку макулатуре. Данный факт приводит к повышению нагрузки на очистное оборудование и ускорению износа рабочих частей сортировок и мельниц. Зольность характеризует все минеральные загрязнения без какого-либо деления на фракции или источники возникновения. Снижение общей зольности продукции становится довольно затруднительным, так как поставщики очистного оборудования гарантируют эффективность удаления только тех минеральных загрязнений, размер которых больше определенного значения (70...100 мкм). Стандартные методики измерения зольности бумаги и картона не подразумевают возможность определения фракционного состава. Для решения данной проблемы авторами была применена методика установления фракционного состава сыпучих материалов в аттестованной лаборатории. Методика подготовки проб для проведения анализа разработана авторами самостоятельно. На основании результатов исследований удалось выявить объем той фракции зольности, который может быть выделен посредством очистного оборудования. Данный объем включает в основном кварцевый песок различной степени измельчения, а другая часть – наполнитель, карбонат кальция, его нельзя эффективно удалить из технологического процесса вследствие небольшого размера частиц. Для определения содержания карбоната кальция использовали качественный и количественный методы исследований – обработку соляной кислотой с последующей промывкой и взвешивание образовавшегося осадка. Данная методика испытаний и результаты исследовательской работы могут служить обоснованием необходимости установки дополнительного или модернизации существующего очистного оборудования. К сожалению, в настоящее время нет данных об абразивной

способности основного наполнителя – карбоната кальция – и его влиянии на срок службы гофроагрегата. Также отсутствует информация о критическом размере частиц золы, который приводит к неизбежному ускоренному износу валов. В то же время определение критического размера частиц является важным с точки зрения настройки и модернизации очистного оборудования размольно-подготовительного отдела бумажной фабрики, перерабатывающей макулатурное сырье.

Ключевые слова: зольность, зола, наполнитель, макулатура, тарный картон

Для цитирования: Жирнов Д.Н., Дернова Е.В., Гораздова В.В., Дулькин Д.А. Зольность тарного картона. Проблемы и пути их решения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 184–194. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-184-194>

Original article

Ash Content of Containerboard. Problems and Solutions

Denis N. Zhirnov¹, Candidate of Engineering, ResearcherID: [HKE-0109-2023](https://orcid.org/0000-0003-4243-3536),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-3536>

Elena V. Dernova², Candidate of Engineering, ResearcherID: [HKE-0047-2023](https://orcid.org/0000-0002-7869-9646),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-9646>

Victoria V. Gorazdova^{2✉}, Candidate of Engineering, ResearcherID: [GWC-4729-2022](https://orcid.org/0000-0003-4732-7791),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4732-7791>

Dmitry A. Dulkin², Doctor of Engineering, ResearcherID: [HKD-9977-2023](https://orcid.org/0000-0001-6517-2979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6517-2979>

¹LLC Sukhonsky Cardboard and Paper Mill, sq. Pechatkin, bldg. 4, Sokol, Vologodskaya Oblast, 162135, Russian Federation; zhirnov@suhona.com

²LLC «Management company “Consolidated Paper Mills”», 22nd kilometer of the Kievskoe highway, Moskovsky settlement, household 4, bldg. 1, block B, Moscow, 108811, Russian Federation; edernova@ukobf.com, vgorazdova@ukobf.com[✉], ddulkin@ukobf.com

Received on January 19, 2023 / Approved after reviewing on April 11, 2023 / Accepted on April 16, 2023

Abstract. This article covers the study of the nature of ash content of containerboard from waste paper, as well as fractional composition of ash. With increasing use of waste paper with white top layer and deterioration of conditions of collecting and storing waste paper at the storing fields, there is an increase in mineral impurities in the incoming waste paper. This fact leads to increased load on cleaning equipment and accelerated wear of working parts of sorters and mills. Ash content includes all mineral impurities without any division into fractions or sources of occurrence. Reducing the total ash content of products becomes quite difficult, because suppliers of cleaning equipment guarantee the efficiency of removing only those mineral contaminants, the size of which is greater than the a certain value (70...100 microns). Standard methods for determining ash content of paper and cardboard do not imply the possibility of determining the fractional composition. To solve this problem, the authors applied a method for determining the fractional composition of granular materials in a certified laboratory. The method of sample preparation for analysis was developed by the authors independently. Based on the results of the research, it was possible to identify the volume of the ash fraction that can be separated by means of cleaning equipment. This volume is mainly quartz sand of various degrees of grinding, and the other part of ash content is the

filler, calcium carbonate, which cannot be effectively removed from the technical process due to the small particle size. To determine the content of calcium carbonate, qualitative and quantitative research methods were used - treatment with hydrochloric acid followed by washing and weighing of the resulting sludge. This test methodology and the results of the research work can serve as a basis for the need to install additional or upgrade the existing cleaning equipment. Unfortunately, at present there are no studies concerning abrasive ability of the main filler – calcium carbonate, and its influence on service life of the corrugator. Also, at the moment there are no data concerning critical size of ash particles, which lead to accelerated wear of the rolls. At the same time, determination of critical particle size is important from the point of view of setting up and upgrading of cleaning equipment of the stock preparation department of a typical paper mill processing waste paper raw materials.

Keywords: ash content, ash, filler, waste paper, containerboard

For citation: Zhirnov D.N., Dernova E.V., Gorazdova V.V., Dulkin D.A. Ash Content of Containerboard. Problems and Solutions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 184–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-184-194>

Введение

В настоящее время широкое использование макулатурного картона с белым поверхностным слоем, а также неудовлетворительные условия хранения макулатуры в местах заготовки приводят к повышенному содержанию минеральных частиц в заготавливаемом вторичном сырье. Для производства качественного белого поверхностного слоя кроме беленых видов целлюлозы или беленых волокнистых полуфабрикатов применяют различные наполнители, в том числе мел. Использование мела обусловлено как желанием улучшить печатные свойства продукции, так и экономическими показателями (частичная замена более дорогостоящего целлюлозного волокна) [1, 2]. Таким образом, содержание наполнителя в композиции белого покровного слоя картона может достигать 20...25 %. Условия заготовки макулатуры являются дополнительным источником крупных минеральных включений. С полигонов вместе с макулатурой поступают песок и другие нежелательные минеральные включения различного происхождения.

Технология переработки макулатуры подразумевает применение оборудования для очистки макулатурной массы от тяжелых включений (скрепки, крупный песок и др.) [4, 5, 7], что защищает технологическое оборудование от чрезмерного абразивного износа рабочих частей [6–13, 19]. Как правило, в зависимости от размера минеральных частиц и концентрации массы очистное оборудование размещается в начале технологического потока и перед подачей макулатурной массы непосредственно на бумагоделательную машину (БДМ) [14, 17]. Эффективность функционирования данного оборудования существенно зависит от размера минеральных частиц – чем он больше, тем выше эффективность [15, 18].

С этой точки зрения зольность макулатуры необходимо рассматривать не только с позиций общей зольности, но и с позиций размера частиц. Крупные частицы (более 100 мкм) обычно поступают с полигонов заготовки в качестве загрязнений и представляют собой различные фракции кварцевого песка. Мелкие частицы (менее 100 мкм) образуются при механическом исти-

рании кварцевого песка в процессе подготовки макулатурной массы, например при размоле. Более мелкие частицы (менее 12 мкм) относятся к фракциям наполнителя. Так, медианный размер частиц механически измельченного наполнителя из натурального мрамора составляет 3 мкм, 50 % частиц имеют размер менее этого значения; при этом максимальный размер – 12 мкм, размер 98 % частиц ниже данного значения. Размер отделяемых минеральных включений должен быть свыше 100 мкм, что приведет к возрастанию эффективности удаления первичного (неизмельченного) кварцевого песка с увеличением размера частиц.

Данные мониторинга очистного оборудования позволяют сделать вывод о том, что фактически отделяемый объем крупной фракции минеральных включений из общей зольности составляет 1,9...3,7 % [3, 16, 20]. Такой диапазон может показаться очень скромным, но с учетом суточной выработки количество вывозимых на мусорные полигоны минеральных загрязнений – более 800 кг, при этом фактическая зольность готовой продукции из макулатурной массы равняется примерно 6...7 %.

Увеличение содержания наполнителя в производственной воде обуславливает дополнительное выделение углекислого газа при снижении уровня pH воды. Например, если в технологический поток поступает макулатура, pH водной вытяжки которой ниже нейтрального, то возможно уменьшение общего pH технологического потока с возникновением перечисленных проблем. Это неблагоприятный фактор с точки зрения качества бумажного полотна. Повышение содержания воздуха в бумажной массе напорного ящика приводит как к ухудшению обезвоживания бумажной массы и, следовательно, к увеличению влажности готовой продукции и снижению прочностных и жесткостных показателей, так и к уменьшению равномерности формирования бумажного полотна.

Для определения необходимости установки дополнительного очистного оборудования было проведено исследование по выявлению фракционного состава зольности готовой продукции и бумажной массы в напорном ящике БДМ.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использованы пробы макулатурной массы и образцы готовой продукции. Пробы золы получали путем сжигания навески макулатурной массы и образцов готовой продукции в муфельной печи при температуре 525 °С в соответствии с ГОСТ Р ИСО 1762–2022 «Бумага, картон и целлюлоза. Метод определения остатка (золы) при прокаливании при 525 °С», что гарантирует отсутствие разложения карбоната кальция. Пробы золы проанализированы на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц Malvern Mastersizer 2000 с диспергатором HYDRO 2000G (по ГОСТ Р 8.777–2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения») в Курчатовском институте. Для исключения из общей зольности наполнителя (карбоната кальция) использована методика международного стандарта TAPPI T 244 sm-11.

Результаты исследования и их обсуждение

Фракционный состав частиц золы в пробах бумажной массы и образцах готовой продукции представлен на рис. 1 и 2. Фракционный состав золы в образцах имеет характерный пик при размере 12 нм, красной линией отмечен критический размер частиц – более 100 нм, который может отрицательно сказываться на последующей переработке.

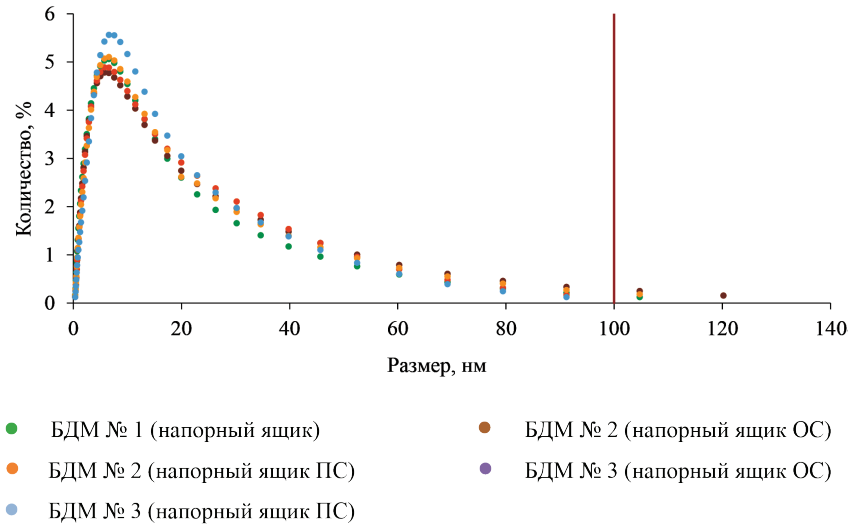


Рис. 1. Фракционный состав частиц золы в пробах бумажной массы (ПС – покровный слой; ОС – основной слой)

Fig. 1. Fractional composition of ash particles in paper pulp samples

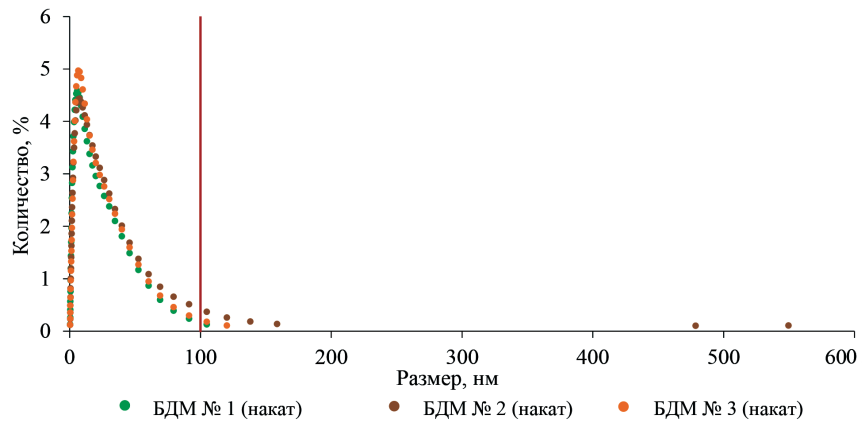


Рис. 2. Фракционный состав частиц золы в образцах готовой продукции

Fig. 2. Fractional composition of ash particles in finished product samples

Пробы бумажной массы и образцы готовой продукции были выработаны на БДМ с разным уровнем удержания мелкодисперсного волокна (табл. 1). Характеристики фракционного состава золы в пробах бумажной массы и готовой продукции представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 1

**Средневзвешенные коэффициенты удержания мелкого
макулатурного волокна на БДМ, %**
Weighted average retention rate of fine waste paper fiber on PM, %

Образец	№ пробы		
	1	2	3
БДМ № 1 (напорный ящик)	88,0		
БДМ № 2 (напорный ящик ОС)	78,5	83,3	86,0
БДМ № 2 (напорный ящик ПС)	63,5	78,5	69,0
БДМ № 3 (напорный ящик ОС)	82,0		
БДМ № 3 (напорный ящик ПС)	81,5		

Таблица 2

Фракционный состав частиц золы в пробах бумажной массы
Fractional composition of ash particles in paper pulp samples

Образец	Доля от общего содержания (%) зольных частиц размером (мкм)											
	более 100			50...100			менее 50			менее 12		
	№ пробы											
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
БДМ № 1 (напорный ящик)	0,10			1,90			98,00			76,50		
БДМ № 2 (напорный ящик ОС)	3,28	0,44	0,47	2,52	2,43	3,13	94,20	97,13	96,40	71,50	72,60	73,23
БДМ № 2 (напорный ящик ПС)	1,32	0,07	0,05	1,94	1,68	2,55	96,74	98,27	97,40	74,09	75,17	69,42
БДМ № 3 (напорный ящик ОС)	0,40			2,40			97,20			73,80		
БДМ № 3 (напорный ящик ПС)	0,05			1,75			98,20			73,20		

Очевидно, что с повышением общего удержания на сеточном столе увеличивается и удержание мелкодисперсной фракции зольности (менее 12 мкм). Данный вывод подтверждается результатами определения фракционного состава как бумажной массы, так и готовой продукции, выработанной на БДМ № 1 (табл. 1 и 2).

Таблица 3

Фракционный состав частиц золы в готовой продукции
Fractional composition of ash particles in finished products

Образец	Доля от общего содержания (%) зольных частиц размером (мкм)							
	более 100		50...100		менее 50		менее 12	
	№ пробы							
	1	2	1	2	1	2	1	2
БДМ № 1	0,10		2,60		97,30		71,40	
БДМ № 2	2,98	0,10	4,46	2,44	92,56	96,65	62,40	69,04
БДМ № 3	0,30		2,90		96,80		68,70	

За 100 % взят весь массив данных и разделен на 3 группы: более 100, 50...100, менее 50 мкм. Также приведена группа мелкодисперсной фракции золы бумажной массы – менее 12 мкм, которая входит в состав группы менее 50 мкм. Относительно высокое наличие частиц более 100 мкм на БДМ № 2 (1,5 %) обусловлено повышенным содержанием этой фракции в массе напорного ящика основного слоя данной БДМ (табл. 2).

Для оперативного контроля (по затратам времени) содержания песка и наполнителя в макулатурной массе выполнен лабораторный количественный и качественный анализ фракций минеральных включений. В состав золы могут входить:

- минеральные вещества, содержащиеся в целлюлозе, и остатки химикатов, применяемых при производстве целлюлозы;
- металлосодержащие частицы от труб и оборудования;
- наполнители, пигменты, покрытия или остатки различных добавок, используемых при производстве бумаги и картона;
- песок, попадающий в производство с макулатурой.

Определение зольности проводили по стандартной методике ГОСТ Р ИСО 1762–2022. Данный метод применим для всех видов целлюлозы, бумаги и картона и позволяет точно установить содержание минеральных веществ в испытуемом образце. Прокаливание при температуре 525 °С практически не оказывает влияния на изменение массы некоторых наполнителей и пигментов (например, карбоната кальция, глины, диоксида титана), содержащихся в бумаге, картоне и целлюлозе.

При исключении из общей зольности наполнителя (карбоната кальция) по методике международного стандарта TAPPI T 244 sm-11 остаток после прокаливания при температуре 525 °С обработан несколько раз соляной кислотой с последующим выпариванием на паровой бане досуха, промыт горячей дистиллированной водой (до отсутствия реакции на хлорид-ионы) и повторно прокален. По отношению массы нерастворимого остатка к массе остатка, взятого для анализа после прокаливания при 525 °С, определена доля песка в пробе.

Для испытаний отбирали пробу золы в количестве 1 г для каждой исследуемой точки БДМ № 1, 2, 3. В табл. 4 приведены данные общей зольности (стандартный метод прокаливания при 525 °С), доли песка (стандарт TAPPI T 244 sm-11) и количества наполнителя.

Таблица 4

Общая зольность, количество песка в пробе золы и наполнителя
Total ash content, amount of sand in ash and filler sample

Образец	Общая зольность, %	Доля, % от общей зольности	
		остатка, нерастворимого в соляной кислоте	наполнителя
БДМ № 1 (напорный ящик)	10,5	22,7	77,3
БДМ № 1 (накат)	7,0	21,8	78,2
БДМ № 2 (напорный ящик ОС)	10,6	22,0	78,0
БДМ № 2 (напорный ящик ПС)	10,6	24,2	75,8
БДМ № 2 (накат)	6,8	21,1	78,9
БДМ № 3 (напорный ящик ОС)	10,2	22,1	77,9
БДМ № 3 (напорный ящик ПС)	12,7	23,5	76,5
БДМ № 3 (накат)	6,4	22,0	78,0

Из полученных данных следует, что фактическое содержание песка в пробе золы составляет 21,1...22,0 % для наката и 22,7...24,2 % в пробах бумажной массы из напорных ящиков БДМ № 1, 2, 3.

Затем проводили повторные исследования зольного остатка в пробах бумажной массы из напорного ящика основного слоя и бумаги с наката БДМ № 3. Сопоставление результатов испытаний отражено в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний образцов золы БДМ № 3 (2020–2021 гг.)
Test results of PM 3 ash samples (2020–2021)

№ пробы	Точка отбора	Общая зольность, %	Доля, % от общей зольности	
			остатка, нерастворимого в соляной кислоте	наполнителя
1	Напорный ящик ОС	10,7	22,7	77,3
	Накат	6,4	22,7	77,3
2	Напорный ящик ОС	10,2	22,1	77,9
	Накат	6,4	22,0	78,0

При анализе результатов заметно, что в течение года существенных изменений количественного содержания песка в зольном остатке не произошло, его содержание в пробах также незначительно – 22,1...22,7 % от общей зольности. Разница в значениях составляет 0,6 и 0,7 % для напорного ящика основного слоя и наката БДМ № 3 соответственно.

Таким образом, данные эксперимента, полученные методом лазерной дифракции с традиционными представлениями о фракционном разделении наполнителя и песка, сходятся с данными более оперативного метода лабораторного контроля количества наполнителя по методике TAPPI T 244 sm-11.

Выводы

1. Для оперативного контроля содержания песка и наполнителя может использоваться лабораторный анализ количественного определения песка по методу TAPPI T 244 sm-11.

2. С учетом существующих особенностей и ограничений систем вихревой очистки содержание фракции (свыше 50 мкм), которая может быть удалена, составляет 2,0...4,1 % общей зольности или 0,12...0,24 % в натуральном выражении. Данный вывод подтверждается лабораторными методами анализа.

3. Как следует из производственной практики, наибольшую опасность для гофровалов представляет крупная фракция песка. Критический размер фракции в настоящее время не определен. Присутствие в золе наполнителя, который является слабым абразивом, также может вносить свой вклад в повышенный износ рабочих элементов оборудования.

4. Рост количества наполнителя в производственной воде создает дополнительный эффект газообразования при снижении pH воды вследствие выделения углекислого газа. Этот неблагоприятный фактор в конечном итоге приводит к увеличению влажности готовой продукции и снижению прочностных и жесткостных показателей, равномерности бумажного полотна.

5. В условиях относительно низкого содержания крупной фракции песка (с размерами частиц более 100 нм) – 0,05...1,4 % использование дополнительного очистного оборудования является нецелесообразным. В данных условиях необходимо сосредоточиться на максимальном выделении минеральной части на стадии роспуска макулатуры, чтобы исключить дальнейшее измельчение. Данное направление требует дополнительных исследований с определением фракционного состава минеральной части на каждой стадии технологического процесса.

6. Существующие методы очистки макулатурной массы от минеральных включений позволяют убрать только крупнодисперсную часть минеральной составляющей. Часть крупнодисперсного песка, которая своевременно не удаляется на стадии роспуска макулатуры, дополнительно измельчается, проходя через стадии очистки. Данный факт объясняется только практически наблюдениями, поскольку источниками песка в макулатуре являются промышленные полигоны. Изначальный «нативный» песок является крупнодисперсным, и наличие в технологическом потоке фракций размером от 50 нм и выше косвенно говорит о том, что крупный песок при прохождении через размольную гарнитуру дополнительно измельчается, образуя мелкую фракцию.

Массоподготовительный отдел становится более энерго- и машиноёмким, т. е. увеличивается число стадий размола макулатуры, при этом электродвигатели современных мельниц потребляют большое количество электроэнергии. Повторное выведение уже мелкодисперсной минеральной части становится практически невозможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акулов Б.В., Ермаков С.Г. Производство бумаги и картона. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2010. 433 с.
Akulov B.V., Ermakov S.G. *Production of Paper and Cardboard*. Perm, Perm State Technical University Publ., 2010, 433 p.
2. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск: АГТУ, 2007. 1118 с.
Dulkin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. *Current State and Prospects for the Use of Recycled Fiber from Waste Paper in the Global and Domestic Paper Industry*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State Technical University Publ., 2007. 1118 p.
3. Журнов Д.Н. Оптимизация процессов подготовки бумажной массы с использованием ключевых показателей эффективности: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2019. 127 с.
Zhironov D.N. *Optimization of Paper Pulp Preparation Processes using Key Performance Indicators*: Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2019. 127 p.
4. Иванов С.Н. Технология бумаги. 3-е изд. М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.
Ivanov S.N. *Paper Technology*. 3rd Edition. Moscow, School of Paper Publ., 2006. 696 p.
5. Auhorn W.J. *Chemistry of Chemical and Mechanical Pulp, and Paper: A Historical Review, the Status Quo, and Future Prospects*. Wochenbl. Papierfabr Publ, 2009. 510 p.
6. CEPI Key Statistics. *European Pulp and Paper Industry*. Confederation of European Paper Industries, Brussels. 2013.
7. Chabot B., Daneault C., Fournier F., Morneau D., Arial M. A Methodology to Determine Retention and Drainage in Laboratory. *Paperi Ja Puu*, 2004, vol. 86, no. 6, pp. 445–449.
8. Chamberlain D., Kirwan M.J. *Paper and Paperboard – Raw Materials, Processing and Properties. Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology*, 2nd Ed., New Jersey, USA, Blackwell Publ., 2005, pp. 1–49.
9. Chauhan V.S., Bhardwaj N.K. Effect of Particle Size and Preflocculation of Talc Filler on Sizing Characteristics of Paper. *Appita J.*, 2013, vol. 66(1), pp. 66–72.
10. Chauhan V.S., Bhardwaj N.K., Chakrabarti Swapan K. Inorganic Filler-modification and Retention During Papermaking: A Review. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, 2011, vol. 23(2), pp. 93–100.
11. Deng Y.L., Jones P., McLain L., Ragauskas A.J. Starch-modified Fillers for Linerboard and Paper Grades: A Perspective Review. *TAPPI J.*, 2010, vol. 9(4), pp. 31–36. <https://doi.org/10.32964/TJ9.4.31>
12. Fan H., Wang S., Liu J. The Influence of Particle Size of Starch- sodium Stearate Complex Modified GCC Filler on Paper Physical Strength. *BioResources*, 2014, vol. 9(4), pp. 5883– 5892. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.5883-5892>
13. Giese T. Dispersants for Fillers and Coating Pigments. *Professional Papermaking*, 2007, vol. 4(2), pp. 22–26.
14. Gill R.A. TAPPI 2004 Introduction to Wet End Chemistry Course Notes. *TAPPI Press*, 2004, Atlanta.

15. Hjelt T., Sirviö J., Saarela M. Effect of Filler Clustering on Paper Properties. *Appita Journal*, 2008, vol. 61(3), pp. 209–211.

16. Hubbe M.A. Prospects for maintaining strength of paper and paperboard products while using less forest resources: A review. *BioResources*, 2014, vol. 9(1), pp. 1634–1763. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1634-1763>

17. Hubbe M.A., Gill R.A. Fillers for Papermaking: A Review of Their Properties, Usage Practices, and Their Mechanistic Role. *BioResources*, 2016, vol. 11(1), pp. 2886–2963. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.2886-2963>

18. Hubbe M.A. Filler Particle Shape vs. Paper Properties – A Review, *Proc. TAPPI 2004 Spring Tech. Conf.*, Paper 7–3, TAPPI Press, Atlanta.

19. Kinoshita N., Katsuzawa H., Nakano S., Muramatsu H., Suzuki J., Ikumi Y., Yukie T. Influence of Fibre Length and Filler Particle Size on Pore Structure and Mechanical Strength of Filler-containing Paper. *Can. J. Chem. Eng.*, 2000, vol. 78(5), pp. 974–982. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450780515>

20. Zhang M., Song S., Wang J., Sun J., Li J.Z., Ni Y., Wei X. Using a Novel Fly Ash Based Calcium Silicate as a Potential Paper Filler. *BioResources*, 2013, vol. 8(2), pp. 2768–2779. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2768-2779>

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

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*52

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-195-203

Запасы углерода в 40-летних культурах сосны обыкновенной

Д.Н. Клевцов, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-157X>

О.Н. Тюкавина[✉], д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; d.klevtsov@narfu.ru, o.tukavina@narfu.ru[✉]

Поступила в редакцию 19.05.22 / Одобрена после рецензирования 22.08.22 / Принята к печати 27.08.22

Аннотация. Представлена оценка запасов углерода в компонентах надземной фитомассы древесного яруса 40-летних посевов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих в различных лесорастительных условиях Балтийско-Белозерского таежного района Европейского Севера России. Исследованные сосновые культуры созданы на свежих незадернелых вырубках со слабой степенью захламленности в лишайниковом, брусничном и черничном типах лесорастительных условий, которые характеризуются существенными различиями по биопродукционному потенциалу. Установлено, что наименьший пул углерода формируется в древостое 40-летнего соснового культурфитоценоза лишайникового типа (16,59 т/га), наибольший – в черничном типе условий местопроизрастания (69,41 т/га). В искусственно созданном 40-летнем сосняке брусничном запасы углерода в надземной фитомассе древесного яруса имеют промежуточное положение (44,40 т/га). Наибольшее значение запаса углерода достигает в таком компоненте надземной фитомассы, как древесина ствола. Доля запасов углерода в данной фракции от общей надземной фитомассы древостоя исследованных сосновых ценозов изменяется от 59,5 % в лишайниковом типе условий местопроизрастания до 75,6 % в черничном. Ветви и хвоя имеют близкие количественные значения запасов углерода и схожую структуру дифференциации по лесотипологическому градиенту, занимая второстепенное положение по углеродному пулу древостоя исследованных искусственных сосняков после стволовой древесины. Доля углерода, связанного данными фракциями надземной фитомассы древостоя, уменьшается от наименее продуктивного сосняка лишайникового к более производительному сосняку черничному. Доля углерода, аккумулированного стволовой корой, в общем пуле углерода надземной фитомассы древостоя исследованных искусственных сосняков имеет тенденцию к снижению от сосняка лишайникового к сосняку черничному. На фракцию сухих сучьев приходится наименьший процент запасов углерода в древесном ярусе по всем исследованным лесорастительным условиям (2,3–5,9 %).

Ключевые слова: углерод, запасы углерода, надземная фитомасса, искусственные сосняки, Европейский Север

Для цитирования: Клевцов Д.Н., Тюкавина О.Н. Запасы углерода в 40-летних культурах сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 195–203. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-195-203>

Original article

Carbon Stocks in 40-year Scots Pine Crops

Denis N. Klevtsov, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [A-7791-2019](https://orcid.org/0000-0001-6902-157X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-157X>

Olga N. Tyukavina[✉], Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; d.klevtsov@narfu.ru,
o.tukavina@narfu.ru[✉]

Received on May 19, 2022 / Approved after reviewing on August 22, 2022 / Accepted on August 27, 2022

Abstract. The paper presents an assessment of carbon stocks in components of above-ground phytomass of the tree layer of 40-year Scots pine crops (*Pinus sylvestris* L.) growing in different forest conditions of the Baltic-Belozersky taiga region of the European North of Russia. The studied pine crops were created on fresh, unsodded clearings with a low degree of litter in lichen, lingonberry and bilberry types of forest growth conditions, which are characterized by significant differences in bioproductive potential. It was found that the smallest carbon pool is formed in the stand of a 40-year pine stand of lichen-type culture-phytocenosis (16.59 t/ha), the largest – in the blueberry type of habitat conditions (69.41 t/ha). In artificially created 40-year lingonberry pine forest, carbon stocks in the above-ground phytomass of the tree layer have an intermediate position (44.40 t/ha). The highest relative value of bound carbon is reached in such component of aboveground phytomass as trunk wood. The share of carbon stocks in this fraction of the total aboveground phytomass of the forest stand of the studied pine cenoses varies from 59.5 % in lichen type of habitat conditions to 75.6 % in blueberry one. Branches and needles have close quantitative values of carbon stocks and similar structure of differentiation along the forest typological gradient, occupying a secondary position in the carbon pool of the forest stand of the studied artificial pine forests after stem wood. The proportion of carbon bound by these fractions of aboveground phytomass of the stand decreases from the least productive lichen pine forest to the more productive blueberry pine forest. The share of carbon accumulated by stem bark in the total carbon pool of aboveground phytomass of the stand of the studied artificial pine forests tends to decrease from lichen pine forest to blueberry pine forest. The fraction of dry branches has the smallest percentage of carbon stocks in the tree stand in all studied forest conditions (2.3–5.9 %).

Keywords: carbon, carbon stocks, aboveground phytomass, artificial pine forests, European North

For citation: Klevtsov D.N., Tyukavina O.N. Carbon Stocks in 40-year Scots Pine Crops. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 195–203. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-195-203>



Введение

Биологическая продуктивность – фундаментальное свойство биосферы, способность живого вещества воспроизводить биомассу и образовывать биотический покров [2]. Лесные сообщества играют важную роль в глобальных потоках веществ и энергии, являясь существенными накопителями фитомассы в биосфере. За счет процессов депонирования и эмиссии углерода леса участвуют в изменении климата Земли. Потоки углерода можно связать с продуктивностью лесных насаждений, а именно с запасом древесины и ее приростом, так как основная часть фитомассы лесов сосредоточена в деревьях [11].

Баланс углекислоты на нашей планете поддерживают две группы процессов: биологические (использование углекислого газа при фотосинтетической деятельности растений и дыхание аэробных организмов) и химические (высвобождение углекислого газа при пожарах, в результате разложения мертвой органики, промышленного сжигания углеводородов). Доля неорганических процессов фиксации углекислого газа от его суммарного поглощения из атмосферы составляет около 0,1 %. Наибольшей величины фиксации CO_2 (99,9 %) достигают зеленые растительные организмы (в т. ч. лесные), что обусловливается их фотосинтетической деятельностью [9, 19]. Связывая существенную долю углерода из атмосферы от общей поглотительной способности всех наземных экосистем, леса выступают в качестве основных биологических резервуаров стока углерода. Таким образом, лесные экосистемы являются активными механизмами стабилизации потоков углерода на Земле. Сохранение первобытных (девственных) лесов, лесоразведение и своевременное лесовосстановление становятся залогом успешного решения проблемы компенсации антропогенной эмиссии углекислого газа в атмосферу при использовании природных ископаемых энергетических ресурсов.

Мировое научное сообщество в последние десятилетия уделяет большое внимание такой экологической проблеме, как углерододепонирующая способность лесов [17, 18, 20, 23, 24]. Бореальные леса занимают существенное положение в стабилизации биосферных климатических процессов и ослаблении парникового эффекта, поскольку им свойственны медленные темпы биогенной миграции углерода от связывания при фотосинтезе до растянутого во времени возврата в атмосферу при разложении мертвой органики. Точность оценок запасов углерода зависит от ряда факторов и особенно от степени исследования приходной части «углеродного бюджета». Первым шагом человечества в этом направлении может стать создание базы данных о фиксированных лесной фитомассой запасах углерода.

По мнению В.А. Алексеева, Р.А. Бердси [12], на основе исследования запасов фитомассы лесных фитоценозов в них устанавливают пулы углерода. На биосферном уровне все острее встают вопросы прогнозирования экологической ситуации, что обусловливается сложившейся нехваткой данных о запасах, структуре и динамике фитомассы лесной растительности, использовании неупроченных методов наблюдения [13]. Проблемы адекватности моделей потоков углерода затрудняют оценку роли лесов в глобальном углеродном балансе [9]. Необходима точная информация о количестве углерода, хранящегося в различных типах лесов [6, 21, 22].

Существенный вклад в поддержание углеродного баланса Земли вносят лесные экосистемы Европейского Севера России. В настоящей работе под Европейским Севером на основе сходства природных и естественно-исторических условий понимаются Республика Коми, Архангельская и Вологодская области. Согласно распоряжению Губернатора Вологодской области от 29.11.2021 г. № 6306-р «О внесении изменений в распоряжение Губернатора области от 30 ноября 2018 года № 4807-р» в лесном плане Вологодской области на период 2018–2027 гг. искусственное лесовосстановление планируется провести на площади 75 915 га (3,7 % – посев семян; 96,3 % – посадка сеянцев).

В лесном фитоценозе подавляющую часть фитомассы (95 % и более по весу) составляет древостой, лишь 4–5 % и менее приходится на его нижние ярусы [5]. Как отмечают А.М. Швецов, С.М. Швецов [16], древостой является основным компонентом лесных биогеоценозов, который в большей степени определяет развитие всех других его элементов.

Цель исследования – оценка запасов углерода в компонентах надземной фитомассы древесного яруса искусственно созданных 40-летних сосновых ценозов различных типов лесорастительных условий, произрастающих в Балтийско-Белозерском таежном районе Европейского Севера России.

Объекты и методы исследования

Для проведения исследований подобраны 40-летние посевы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), занимающие разное эколого-ценотическое положение в пределах Балтийско-Белозерского таежного района Европейского Севера (Вологодская область). Дендрометрическая характеристика исследованных сосновых культурфитоценозов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика 40-летних сосняков искусственного происхождения

Forestry and taxational characteristics of 40-year pine forests of artificial origin

Тип лесорастительных условий	Первоначальная густота, шт./га	Состав	Средние		Класс бонитета	Количество деревьев, шт./га	Полнота	Запас, м ³ /га
			диаметр, см	высота, м				
Лишайниковый	6000	10С	6,0	7,4	V	5160	1,0	82
Брусничный	5000	10С	9,7	12,3	III	3250	1,0	171
Черничный	5000	9С	14,7	16,6	I	1117	0,7	176
		1Б	17,5	18,7	–	108	0,1	23
<i>Всего</i>						1225	0,8	199

Полевому исследованию предшествовали камеральные работы по изучению документальных материалов и рекогносцировочные обследования подобранных искусственных сосновых насаждений. На основе камерального анализа материалов установлено, что исследованные лесные культуры

создавали на свежих незадернелых вырубках со слабой степенью захламленности в лишайниковом, брусничном и черничном типах лесорастительных условий, которые характеризуются существенными различиями по биопродукционному процессу. Обработка почвы на исследованных участках посевов сосны обыкновенной с дренированными почвами заключалась в основном в измельчении и перемешивании на глубину до 15 см подстилки с минеральными горизонтами. Работы проводились вручную при помощи лопат и мотыг.

На подобранных участках сосновых культур закладывали пробные площади и собирали опытные данные посредством выполнения наблюдений и измерений. Опирались на работы В.В. Огиевского, А.А. Хирова [7], Н.Н. Соколова [10], А.Р. Родина, М.Д. Мерзленко [8] и В.А. Усольцева [14].

На каждой пробной площади в пределах всего диапазона проведения исследований отбирали по 10 модельных деревьев. К модельным относили нормально развитые деревья без признаков механических и биологических повреждений. После отбора и валки модельное дерево подлежало обработке, при которой его разделяли на следующие фракции фитомассы: сухие сучья, живые ветви, древесная зелень (охвоенные побеги с диаметром у основания не более 0,8 см), кора и древесина ствола. Фракционную массу измеряли электронным безменом с точностью до 50 г.

В камеральных условиях полевые данные модельных деревьев обрабатывали с использованием регрессионного метода оценки фитомассы. В результате проведенных расчетов получили пофракционные запасы надземной фитомассы древесного яруса исследованных сосновых насаждений в свежесрубленном (сыром) состоянии. Запасы углерода в изученных искусственных сосновых ценозах определяли через фракционные запасы надземной фитомассы древостоев. Для этого применяли конверсионные коэффициенты, устанавливающие, что в 1 кг абсолютно сухой массы хвои содержится 0,45 кг углерода, а в 1 кг абсолютно сухой массы сухих сучьев, ветвей, коры и древесины – 0,5 кг углерода [4]. Долю хвои в древесной зелени принимали 75 % в абсолютно сухом состоянии, а содержание сухого вещества в сухих сучьях, ветвях, древесной зелени, коре и древесине – в среднем 87, 49, 47, 51 и 52 % соответственно [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Углеродоемкость древостоев исследованных сосновых насаждений существенно изменяется по типам лесорастительных условий. Запасы углерода древесного яруса в сосняке черничном максимальны по сравнению с другими изученными сосновыми культурфитоценозами. Различие по аккумулярованному древостоем углероду между сосняком черничным и сосняком брусничным составляет 25,01 т/га, черничным и лишайниковым – 52,82 т/га (табл. 2). Согласно данным М.А. Карасевой [3], основные пулы углерода искусственных насаждений лиственницы сибирской в Среднем Поволжье связаны в надземной фитомассе. При этом стволовая древесина имеет большую долю углерода, а доля данного компонента в общей надземной фитомассе исследованных насаждений с возрастом увеличивается до 80 %.

Таблица 2

**Запасы углерода в надземной фитомассе древесного яруса
40-летних посевов сосны обыкновенной**

**Carbon stock in the aboveground phytomass of the tree layer
of 40-year Scots pine crops, t/ha**

Тип лесорастительных условий	Компоненты надземной фитомассы					Сухие сучья
	ствол		крона		всего	
	древесина	кора	ветви	хвоя		
Лишайниковый	<u>10,50</u> 59,5	<u>1,97</u> 11,2	<u>2,04</u> 11,6	<u>2,08</u> 11,8	<u>16,59</u> –	<u>1,04</u> 5,9
Брусничный	<u>32,60</u> 69,6	<u>4,02</u> 8,6	<u>4,45</u> 9,5	<u>3,33</u> 7,1	<u>44,40</u> –	<u>2,41</u> 5,2
Черничный	<u>53,72</u> 75,6	<u>4,84</u> 6,8	<u>6,82</u> 9,6	<u>4,03</u> 5,7	<u>69,40</u> –	<u>1,62</u> 2,3

Примечание: В числителе – т/га; в знаменателе – % от суммы пулов углерода надземной фитомассы и сухих сучьев.

Структура запасов углерода, связанного компонентами надземной фитомассы древесного яруса исследованных сосновых культурфитоценозов, обусловлена их разным эколого-ценотическим положением. Для выявления характера распределения запасов углерода в надземной части древостоев исследованных культурфитоценозов сосны обыкновенной за 100 % приняли сумму пулов углерода в надземной фитомассе древостоя и его отмершей части (сухие сучья) по каждому из анализируемых типов леса (табл. 2).

Наиболее углеродоаккумулирующей структурой является стволовая древесина: по данному компоненту запас углерода изменяется от 59,5 % в сосняке лишайниковом до 75,6 % в сосняке черничном. К схожим выводам приходят А.И. Уткин с соавторами [15] при исследовании запасов углерода в сосновых насаждениях естественного происхождения Вологодской области, отмечая, что светолюбие сосны, следствием которого является хорошее очищение стволов от сучьев, обуславливает приоритет стволов и корней в накоплении углерода, при незначительном участии в этом процессе крон деревьев.

Ветви и хвоя имеют близкие количественные значения запасов углерода и схожую структуру дифференциации по лесотипологическому градиенту, занимая второстепенное положение по углеродному пулу древостоя исследованных искусственных сосняков после стволовой древесины. Доля углерода, связанного данными фракциями надземной фитомассы древесного яруса, уменьшается от наименее продуктивного сосняка лишайникового к более производительному сосняку черничному. Предположительно, такой характер распределения углеродных пулов в надземной фитомассе древесного яруса изученных сосновых культурфитоценозов обуславливается общими закономерностями биопродукционного процесса древостоев, произрастающих в разных экологических условиях. В наиболее богатых черничных лесорастительных

тельных условиях интенсивность физиологических процессов в древесных растениях выше, за равный промежуток времени они достигают больших размеров по сравнению с деревьями, произрастающими в бедных экологических условиях. Поэтому скелетный блок древостоя для обеспечения надежного поддержания кроны и тока веществ наращивает свои пропорции по отношению к фотосинтезирующему аппарату.

Доля стволовой коры в общем пуле углерода надземной фитомассы древостоев исследованных искусственных сосняков имеет тенденцию к снижению от сосняка лишайникового к сосняку черничному. В исследованных типах искусственных сосновых насаждений на отмершую часть древостоев (сухие сучья) приходится наименьшая доля депонированного углерода по всем лесорастительным условиям (2,3–5,9 %).

Заключение

С улучшением экологических условий произрастания запасы углерода в компонентах надземной фитомассы древесного яруса искусственно созданных ценозов сосны обыкновенной возрастают. Структура депонированного разными фракциями фитомассы углерода также обусловлена лесотипологическими условиями. Данные по углеродному пулу в искусственных насаждениях сосны обыкновенной целесообразно учитывать при расчетах «углеродного бюджета» лесных экосистем, а также при реализации природоохранных проектов и исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса культур сосны и ели в Европейской части России. Архангельск, 2004. 112 с.
Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce Crops in the European Part of Russia*. Arkhangelsk, AGTU Publ., 2004. 112 p. (In Russ.).
2. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 295 с.
Bazilevich N.I. *Biological Productivity of Northern Eurasia Ecosystems*. Moscow, Nauka Publ., 1993. 295 p. (In Russ.).
3. Карасева М.А. Продуктивность и углерододепонирующие функции лиственных фитоценозов в Среднем Поволжье // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 4. С. 22–27.
Karaseva M.A. Productivity and Carbon-depositing Functions of Larch Phytocenoses in the Middle Volga Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2002, no. 4, pp. 22–27. (In Russ.).
4. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
Kobak K.I. *Biotic Components of the Carbon Cycle*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 248 p. (In Russ.).
5. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: МГУЛ, 2002. 399 с.
Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, MGUL Publ., 2002. 399 p. (In Russ.).
6. Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59.
Nakvasina E.N., Shumilova J.N. Dynamics of Carbon Reserves in the Formation of Forests on Postagrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 46–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-46-59>

7. Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. Л.: ЛТА, 1967. 50 с.
Ogievsky V.V., Khirov A.A. *Inspection and Research of Forest Crops*. Leningrad, LTA Publ., 1967. 50 p. (In Russ.).
8. Родин А.Р., Мерзленко М.Д. Методические рекомендации по изучению лесных культур старших возрастов. М.: ВАСХНИЛ, 1983. 36 с.
Rodin A.R., Merzlenko M.D. *Methodological Recommendations for the Study of Old-growth Forest Crops*. Moscow, VASKhNIL Publ., 1983. 36 p. (In Russ.).
9. Саковец В.И., Иванчиков А.А. Запасы и потоки углерода в лесах Карелии // Проблемы лесоведения и лесоводства: материалы Третьих Мелех. чтений, посвящ. 100-летию со дня рождения И.С. Мелехова, 15–16 сент. 2005 г. Архангельск: АГТУ, 2005. С. 14–16.
Sakovec V.I., Ivanchikov A.A. Carbon Fluxes in the Forests of Karelia. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva* = Problems of forest science and forestry. Arkhangelsk, 2005, pp. 14–16. (In Russ.).
10. Соколов Н.Н. Методические указания к дипломному проектированию по таксации пробных площадей. Архангельск: РИО АЛТИ, 1978. 44 с.
Sokolov N.N. *Methodological Instructions for the Diploma Project on Taxation of Sample Areas*. Arkhangelsk, RIO ALTI Publ., 1978. 44 p. (In Russ.).
11. Тишин Д.В. Оценка продуктивности древостоев. Казань: Казан. ун-т, 2011. 31 с.
Tishin D.V. *Evaluation of Forest Stands Productivity*. Kazan, Kazan University Publ., 2011. 31 p. (In Russ.).
12. Углерод в экосистемах лесов и болот России / под ред. В.А. Алексева, Р.А. Бердси. Красноярск: ИЛ СО РАН, 1994. 224 с.
Carbon in Ecosystems of Forests and Swamps of Russia. Ed. by V.A. Alekseev, R.A. Berdsi. Krasnoyarsk, Institute of Forest SB RAS Publ., 1994. 224 p. (In Russ.).
13. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 707 с.
Usoltsev V.A. *Phytomass of Northern Eurasian Forests: Database and Geography*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2001. 707 p. (In Russ.).
14. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.
Usoltsev V.A. *Biological Productivity of Northern Eurasian Forests: Methods, Database, and its Applications*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2007. 636 p. (In Russ.).
15. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Неведьев В.В., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И., Гамбург С.П. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов // Лесоведение. 1997. № 5. С. 51–66.
Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Nefediev V.V., Gulbe T.A., Gulbe Y.I., Hamburg S.P. Determination of Plantation Carbon Stocks in Sample Plots: Comparison of Allometric and Conversion-volume Methods. *Lesovedenie* = Forestry, 1997, no. 5, pp. 51–65. (In Russ.).
16. Швецов А.М., Швецов С.М. Размерная и возрастная структуры древесных пород в условиях сураменей Марийского Заволжья // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодежи, 28 июня – 2 июля 2010 г. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. С. 225–229.
Shvetsov A.M., Shvetsov S.M. Size and Age Structure of Tree Species in the Conditions of Surameni of the Mari Volga Region. *Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity, Monitoring and Adaptation Technologies. Materials of the international*

conference with elements of a scientific school for youth. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2010, pp. 225–229. (In Russ.).

17. Cerny J., Pokorny R., Vejrustkova M., Sramek V., Bednar P. Air Temperature Is the Main Driving Factor of Radiation Use Efficiency and Carbon Storage of Mature Norway Spruce Stands under Global Climate Change. *International Journal of Biometeorology*, 2020, vol. 64. iss. 9, pp. 1599–1611. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01941-w>

18. Dar J.A., Sundarapandian S. Variation of Biomass and Carbon Pools with Forest Type in Temperate Forests of Kashmir Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, vol. 187. iss. 2. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4299-7>

19. Hunt S.L., Gordon A.M., Morris D.M. Carbon Stocks in Managed Conifer Forests in Northern Ontario, Canada. *Silva Fennica*, 2010, vol. 44. iss. 4, pp. 563–582. <https://doi.org/10.14214/sf.128>

20. Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkinen K., Byrne K.A. How Strongly can Forest Management Influence Soil Carbon Sequestration? *Geoderma*, 2007, vol. 137, iss. 3-4, pp. 253–268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>

21. Khan A., Zhang X., Zhang K., Iqbal A., Ahmad A., Saeed S., Hayat M., Yang X. Tree Distribution Pattern, Growing Stock Characteristics and Biomass Carbon Density of Mongolian Scots pine (*Pinus Sylvestris* var *Mongolica*) Plantation of Horqin Sandy Land, China. *Pakistan Journal of Botany*, 2020, vol. 52, iss. 3, pp. 995–1002. [https://doi.org/10.30848/PJB2020-3\(26\)](https://doi.org/10.30848/PJB2020-3(26))

22. Lamtom S.H., Savidge R.A. A Reassessment of Carbon Content in Wood: Variation Within and Between 41 North American Species. *Biomass Bioenergy*, 2003, vol. 25, pp. 381–388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)

23. Malmsheimer R.W., Bowyer J.L., Fried J.S., Gee E., Izlar R.L., Miner R.A., Munn I.A., Oneil E., Stewart W.C. Managing Forests because Carbon Matters: Integrating Energy, Products, and Land Management Policy. *J. For.*, 2011, vol. 109, pp. 7–51.

24. Pohjola J., Valsta L. Carbon Credits and Management of Scots pine and Norway Spruce Stands in Finland. *Forest Policy and Economics*, 2007, vol. 9, iss. 7, pp. 789–798. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2006.03.012>

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*23

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-204-211

Применение обработанной плазмой воды для подготовки семян хвойных пород к посеву

О.И. Гаврилова[✉], *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID*: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

К.В. Гостев, *канд. техн. наук*; *ResearcherID*: [HLW-5102-2023](https://orcid.org/0000-0003-2286-059X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-059X>

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; ogavril@mail.ru[✉], kgostev@petsu.ru

Поступила в редакцию 15.04.22 / Одобрена после рецензирования 26.07.22 / Принята к печати 04.08.22

Аннотация. Рассмотрены вопросы ускоренного выращивания качественного посадочного материала с применением способа подготовки семян намачиванием в обработанной разрядом низкотемпературной плазмы воде. Наиболее перспективным посадочным материалом являются сеянцы с закрытой корневой системой. Они выращиваются из сортового и улучшенного посевного материала в оптимальных условиях теплиц. При разных способах стимулирования прорастания зародыша семени представляет интерес воздействие на него «холодной» плазмой. С помощью специально разработанного прибора, позволяющего обрабатывать воду разрядом низкотемпературной плазмы, была получена обработанная плазмой вода для намачивания семян. Время обработки воды варьировало от 1 до 4 мин. После обработки плазмой вода имела отличные от обычной воды показатели кислотности (активация воды). Восстановление уровня кислотности обработанной плазмой воды заняло от 2 до 4 сут. Получены показатели всхожести и энергии прорастания для семян *Pinus silvestris* и *Picea abies*, намачиваемых в воде с разной длительностью обработки плазмой. При намачивании семян в воде, обработанной плазмой в течение 1, 2 и 4 мин, энергия прорастания увеличилась для сосны на 20–31 %, для ели – на 6–18 % по сравнению с контролем (намачивание в дистиллированной воде). Техническая всхожесть семян сосны выросла на 11–21 %, ели – на 3–16 %. Результаты исследований демонстрируют изменение в структуре и составе питательного вещества семени, в строении зародыша и степени его развития. Анализ химического состава эндосперма семян через сутки после намачивания относительно сухих семян показал увеличение в нем содержания углерода на 2–3 % и уменьшение содержания кислорода на 1 %, калия – на 0,5 %. При намачивании семян в дистиллированной воде содержание в эндосперме фосфора падает на 0,15 %, а содержание натрия – на 0,2 %. Для семян, намоченных в обработанной плазмой воде, содержание фосфора снизилось на 0,21–0,22 %, а содержание натрия не отмечено. Намачивание семян в обработанной плазмой воде стимулирует процессы их подготовки к прорастанию и дифференциацию тканей зародыша (формирование семядолей) по сравнению с семенами, намачиваемыми в дистиллированной воде.

Ключевые слова: лесной питомник, теплица, семена, сосна обыкновенная, ель европейская, эндосперм, зародыш, всхожесть, холодный плазменный спрей

Для цитирования: Гаврилова О.И., Гостев К.В. Применение обработанной плазмой воды для подготовки семян хвойных пород к посеву // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 204–211. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-204-211>

Original article

Use of Plasma-treated Water to Prepare Seeds of Coniferous Species for Sowing

Olga I. Gavrilova[✉], Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAF-6295-2019](https://orcid.org/0000-0002-5618-8239),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

Kirill V. Gostev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [HLW-5102-2023](https://orcid.org/0000-0003-2286-059X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2286-059X>

Petrozavodsk State University, Lenina prosp., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; ogavril@mail.ru[✉], kgostev@petrsu.ru

Received on April 15, 2022 / Approved after reviewing on July 26, 2022 / Accepted on August 4, 2022

Abstract. The article discusses the accelerated cultivation of quality planting material using the method of seed preparation by soaking in water treated in low-temperature plasma discharge. The most promising planting material are seedlings with closed root system. They are grown from improved seed grain in optimal conditions of greenhouses. Among various methods of stimulating germination of the seed germ, it is of interest to influence it with “cold” plasma. With the help of a specially designed device, which allows to treat water with low-temperature plasma discharge, plasma-treated water for soaking seeds was obtained. The time of water treatment varied from 1 to 4 min. Water activated by plasma had acidity indicators other than those of ordinary water. The time of acidity level restoration was from 2 to 4 days. Germination rates and germination energy were obtained for seeds of *Pinus silvestris* and *Picea abies* soaked in water with different duration of plasma treatment. When seeds were soaked in water treated with plasma for 1, 2 and 4 min, germination energy increased by 20–31 % for pine and by 6–18 % for spruce compared to the control (soaking in distilled water). Technical germination of pine seeds increased by 11–21 %, for spruce by 3–16 %. The results of research show changes in the structure and composition of the nutrient substance of the seed, in the structure of the germ and the degree of its development. Analysis of the chemical composition of seed endosperm a day after soaking relative to dry seeds showed an increase in its carbon content by 2–3 % and a decrease in oxygen by 1 %; potassium – by 0.5 %. When seeds were soaked in distilled water, the content of phosphorus in the endosperm decreased by 0.15 %, and the content of sodium – by 0.2 %. For seeds soaked in plasma treated water, phosphorus content decreased by 0.21–0.22 % and sodium content was not observed. Soaking seeds in plasma-treated water stimulates the processes of their preparation for germination and differentiation of germ tissues (formation of seed pods), compared to seeds soaked in water.

Keywords: forest nursery, greenhouse, seeds, common pine, common spruce, endosperm, germ, germination, cold plasma spray

For citation: Gavrilova O.I., Gostev K.V. Use of Plasma-treated Water to Prepare Seeds of Coniferous Species for Sowing. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 5, pp. 204–211. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-204-211>

Введение

Интенсификация лесовосстановления, которая является приоритетным направлением лесного хозяйства, в первую очередь требует качественного посадочного материала. Наиболее перспективным считается посадочный материал с закрытыми корнями [1, 4, 5]. Такие сеянцы чаще выращивают в контролируемых условиях [3, 9]. Ускорение прорастания семян особенно актуально в условиях тепличного хозяйства, когда каждый день важен для формирования всходов [5, 6, 16]. Кроме того, при использовании улучшенных семян с лесосеменных плантаций следует экономить качественное семенное сырье [11]. Для подготовки семян к посеву используется множество способов, одни из которых имитируют природные условия на этапе прорастания [5, 10, 15, 18], другие воздействуют на зародыш семени химически [7, 16, 17].

В настоящее время разработаны способы выведения семян из вынужденного покоя физическими методами. Одним из таких методов является намачивание семян в воде, обработанной плазмой [2, 8, 12–14]. Способ, предложенный в [1], с применением аэрозольных систем с диспергированием потока холодной плазмы, разработанных научно-образовательным центром «Плазма» Петрозаводского государственного университета, имел малую производительность, не позволяющую обрабатывать значимые объемы семян. С целью увеличения производительности был разработан импульсный генератор переохлажденной плазмы [8], используемый для получения обработанной плазмой воды (ОПВ).

Цель работы – исследование влияния обработанной в разряде холодной плазмы воды на всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) и динамику развития зародыша и эндосперма спустя сутки после намачивания.

Объекты и методы исследования

Для подготовки семян основных лесобразующих пород – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) – использовали устройство для обработки воды в разряде низкотемпературной плазмы. Объем обрабатываемой воды – 0,75 л, температура обработки – 40–50 °С, напряжение горения разряда – 5 кВ, импульсный ток – ~40 А, энергия одного импульса – ~1 Дж, скважность – 0,1–0,01, частота импульсов – 1–10 Гц, потребляемая мощность – 50 Вт. При работе импульсного генератора образуется область плазмы, на границе которой происходит воздействие плазмы на воду. Спектр излучения разряда плазмы показывает наличие линий ОН, Н, О, О₂, О₃, Н₂, что говорит о высокой степени разложения воды. Большое количество заряженных частиц приводит к переходу воды в метастабильное энергетическое состояние (активация воды).

Измерение уровня кислотности воды рН-метром показало, что обработка воды плазмой в течение 2 мин привела к изменению кислотности с 6,5 до 8 ед. В течение 24 ч происходило постепенное выравнивание уровня рН до начального, однако при обработке воды плазмой в течение 4 мин наблюдали колебания рН и постепенное восстановление в течение 4 сут. [1].

Для исследования взяты семена сосны обыкновенной 1-го класса качества, с технической всхожестью по сертификату 87 %, и семена ели европейской 2-го класса качества, их техническая всхожесть по сертификату – 76 %. Семена имели местное происхождение и были заготовлены на территории При-

онежского центрального лесничества Республики Карелии. Семена брали в 4 повторностях по 100 семян в каждой.

Семена после намачивания в течение 24 ч в дистиллированной воде, а также в ОПВ (время обработки плазмой – 1, 2 и 4 мин) проращивали по стандартной методике в лабораторных условиях и отмечали появление проростков на 3, 5, 7, 10 и 15 сут. Температура воздуха – 20–22 °С, температура на ложе – 22–24 °С (ГОСТ 13056.6–97 «Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести»).

Для анализа процессов, происходящих в семени, и степени воздействия на семя ОПВ определяли содержание элементов минерального питания в эндосперме семян. Анализ состава основных химических элементов эндосперма, степени развития зародыша и структуры эндосперма проводили с помощью электронного микроскопа фирмы Hitachi SU1510. Исследовали семена ели европейской, намоченные в течение 24 ч в дистиллированной воде, в ОПВ в течение 2 мин, а также сухие. После химического анализа сделаны срезы и получены фотографии.

Результаты исследования и их обсуждение

Всхожесть семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) определяли неоднократно в течение 2018–2019 гг. Она была существенно выше относительно всхожести семян в контроле. Наиболее существенные результаты получены при исследовании скорости прорастания намоченных в ОПВ семян. Они в условиях лаборатории проросли на 3–4 дня раньше семян, намоченных в дистиллированной воде (табл. 1). Процент проросших семян, определяемый на 15-й день проращивания как для сосны, так и для ели был максимальным при времени воздействия на воду 2 мин. При этом отмечено, что энергия прорастания, фиксируемая на 7-й и 10-й дни учета соответственно, превышала показатели контрольного варианта. Таким образом, обработка семян ОПВ привела к увеличению не только энергии прорастания, но и общей всхожести.

Таблица 1

Всхожесть семян хвойных пород при 24-часовом намачивании в ОПВ, %
Germination of coniferous seeds at 24-hour soaking in water treated with plasma, %

Продолжительность обработки воды плазмой, мин	День учета				
	3	5	7	10	15
<i>Сосна обыкновенная</i>					
1	12,5	60,5	79	81	81
2	10	64	80	81	82
4	7	53	68	71	72
Контроль (дистиллированная вода)	8	34	48	58	61
<i>Ель европейская</i>					
1	0	2	38	42	46
2	0	4	50	56	59
4	0	4	48	52	55
Контроль (дистиллированная вода)	0	0	25	38	42,5

Анализ состава элементов минерального питания в семени ели европейской показал значительные изменения в процентном соотношении химических элементов (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание основных питательных веществ
в эндосперме семян ели европейской, %
Content of main nutrients in the endosperm of seeds of common spruce, %**

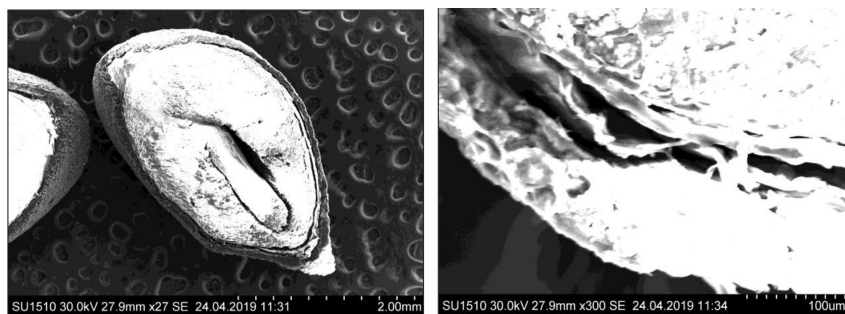
Элемент	Семена, намоченные в течение 24 ч		Сухие семена без обработки (заготовка 2013 г.)
	в дистиллированной воде	в ОПВ*	
C	67,74±0,39	67,80±0,37	65,63±0,40
O	30,12±0,42	30,33±0,41	31,26±0,44
Na	0,17±0,03	0	0,37±0,03
Mg	0,39±0,03	0,44±0,02	0,48±0,02
P	0,77±0,02	0,71±0,02	0,92±0,02
Cl	0,14±0,01	0,07±0,01	0,26±0,02
S	0	0,19±0,01	0,28±0,01
K	0,47±0,02	0,35±0,01	0,81±0,01
Mo	0,20±0,01	0,20±0,01	0
Zn	0	0,11±0,02	0
<i>Всего</i>	100	100	100

* Время обработки воды – 2 мин.

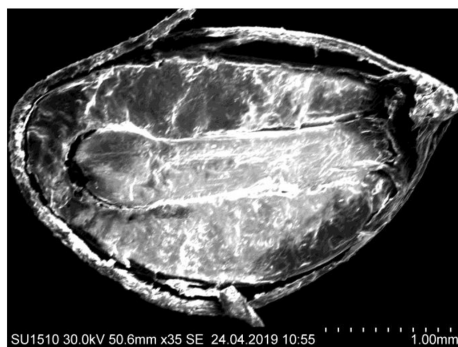
Семена ели европейской, которые хранились в стеклянных бутылках в специализированном семяхранилище при температуре -6°C в течение 5 лет, содержали в эндосперме 65,62 % углерода (табл. 2). При намачивании в воде его содержание увеличилось в процессе поглощения воды семенем за 1-е сутки примерно на 2–3 %. Различия в содержании углерода в эндосперме для всех вариантов намоченных водой семян и сухих семян достоверны на 5%-м уровне значимости ($t_{st} = 3,77; 3,98$ и $4,31 > 3$). При этом не отмечено различий между семенами, намоченными в ОПВ и в дистиллированной воде. Обнаружено уменьшение содержания кислорода в эндосперме семян, намоченных в воде разных вариантов (ОПВ и дистиллят), примерно на 1 %, с 31 до 30 % общего веса данного элемента. Это свидетельствует о начале окислительных процессов в эндосперме независимо от варианта применяемой для обработки семян воды. В процессе набухания активно расходуется фосфор, его содержание в сухом семени уменьшается с 0,92 до 0,77–0,70 % ($t_{st} = 7,85; 7,5; 5,35 > 3$). Таким же образом расходуется в эндосперме семян калий – происходит снижение содержания этого элемента с 0,81 до 0,35 % для семян, намоченных в ОПВ, и до 0,47 % для семян, намоченных в дистиллированной воде. Различия с сухими семенами существенны: $t_{st} > 3$. Изменение в натриево-калиевом балансе, связанном с обеспечением клеток водой, проявляется также в уменьшении содержания натрия в эндосперме семян. Его содержание меняется от 0,37 % для сухих семян до 0,17 % для намоченных дистиллированной водой; натрий не обнаружен в эндосперме семян, намоченных ОПВ. Таким образом, выявлено существенное различие в химическом составе эндосперма сухих семян, семян, намоченных в дистиллированной воде, и семян, намоченных в ОПВ.

Отмечено изменение структуры эндосперма и качественного состояния зародыша. На продольном разрезе семени (см. рисунок, а) видно, что эндосперм сухих семян имеет плотную структуру, не насыщен водой. Зародыш занимает не

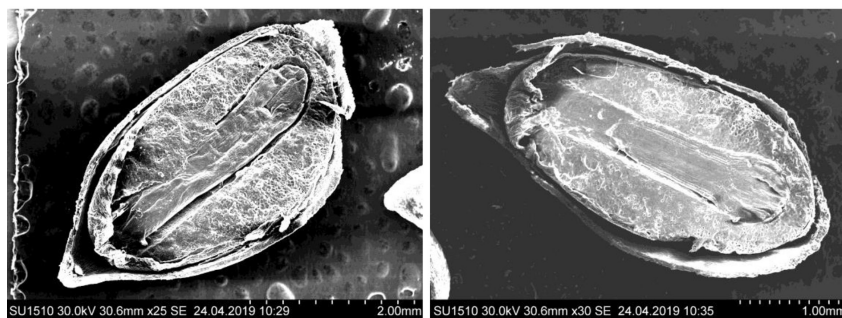
более половины зародышевого канала и не дифференцирован на корешок, гипокотиль и семядоли. Семенная кожура чешуйчатая, наблюдается ее отслоение от эндосперма. Семена ели, которые прошли намачивание дистиллированной водой, имели рыхлую структуру эндосперма, отмечены отслоение семенной кожуры, существенное увеличение зародыша и первичная дифференциация его на органы (см. рисунок, б). На фотографии с электронного микроскопа хорошо заметны изменения, произошедшие в семенах, намоченных в ОПВ (см. рисунок, в). Здесь структура тканей эндосперма также рыхлая, однако для всех исследуемых семян отмечался рост зародыша в длину (он занимал практически весь зародышевый канал) и формирование семядолей. В семени справа отчетливо видно появление семядолей, слева – заполнение зародышевого канала.



a



б



в

Семена ели европейской в разрезе: *a* – сухое, справа – семенная кожура с эндоспермом; *б* – намоченное в течение 24 ч в дистиллированной воде; *в* – намоченное в течение 24 ч в ОПВ (время обработки воды – 2 мин)

Common spruce seeds cutaway: *a* – on the seed skin with endosperm (right) for dry seed; *б* – soaked for 24 hours in distilled water; *в* – soaked for 24 hours in water, treated with plasma for 2 minutes

Итак, намачивание семян ели в воде уже в течение 1-х суток меняет содержание химических элементов в эндосперме. При активации процессов набухания увеличивается зародыш, происходит его развитие с дифференциацией на первичные органы. При обработке семян ОПВ эти процессы происходят существенно быстрее, результатом чего является повышение всхожести семян и более энергичное и раннее их прорастание.

Выводы

1. При намачивании семян в обработанной плазмой воде энергия прорастания увеличилась на 20–31 % для сосны и на 6–18 % для ели.
2. При намачивании в обработанной плазмой воде техническая всхожесть семян сосны увеличилась на 11–21 %, ели – на 3–16 %.
3. Соотношение химических элементов в эндосперме семян, намоченных в течение суток в воде, и в сухих семенах существенно отличается, увеличиваясь при намачивании для углерода на 2–3 % и уменьшаясь для кислорода на 1 %, а для калия – на 0,5 %.
4. При намачивании семян в дистиллированной воде содержание в эндосперме фосфора уменьшается на 0,15 %, а содержание натрия – на 0,2 %. Тогда как для семян, намоченных в обработанной плазмой воде, содержание фосфора снижается на 0,21–0,22 %, а содержание натрия не фиксируется.
5. Намачивание семян в обработанной плазмой воде стимулирует процессы их подготовки к прорастанию и дифференциации тканей зародыша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гостев К.В., Гаврилова О.И., Гостев В.А. Применение холодного плазменного спрея для предпосевной подготовки семян сосны обыкновенной // Вестник МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 1. С. 90–96.
Gostev K.V., Gavrilova O.I., Gostev V.A. Application of Cold Plasma Spray for Pre-sowing Preparation of Scots Pine Seeds. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 90–96. (In Russ.).
2. Гостев К.В., Штыков А.С., Васильев А.С. О потенциале использования низкотемпературной плазмы в промышленности и социальной сфере // Инж. вестн. Дона. 2017. № 3. С. 9.
Gostev K.V., Shtykov A.S., Vasiliev A.S. On the Potential of Using Low-temperature Plasma in Industry and Social sphere. *Inzhenernyy vestnik Dona* = Engineering Bulletin of the Don, 2017. no. 3, 9 p. (In Russ.).
3. Жигунов А.В. Посадочный материал с закрытой корневой системой // Лесн. хоз-во. 1995. № 4. С. 33–38.
Zhigunov A.V. Closed Root Planting Material. *Lesnoye khozyaystvo* = Forestry, 1995, no. 4, pp. 33–38. (In Russ.)
4. Касимов А.К. Развитие корневой системы сосны в посадках и посевах при механической обработке почвы // Изв. вузов. Лесн. журн. 1995. № 2-3. С. 30–38.
Kasimov A.K. The Development of the Pine Root System in Plantings and Crops Under Mechanical Soil Cultivation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1995, no. 2–3, pp. 30–38. (In Russ.).
5. Маркова И.А., Жигунов А.В. Специфика использования посадочного материала в различных подзонах бореальных лесов // Лес, окружающая среда и новые технологии в Северной Европе: докл. междунар. конф., Петрозаводск, сент. 1993 г. Йоэнсуу: Ун-т Йоэнсуу, 1994. № 17. С. 432–433.
Markova I.A., Zhigunov A.V. Specificity of Using Planting Material in Various Subzones of Boreal Forests. *Dokl. international conf. Forest, environment and new technologies in Northern Europe*. Petrozavodsk, 1993. Ed. Universitet Joensuu, no. 17., 1994, pp. 432–433. (In Russ.).

6. Наквасина Е.Н. О ритмах питания однолетних сеянцев ели в лесном питомнике // Изв. вузов. Лесн. журн. 1979. № 2. С. 12–16.

Nakvasina E.N. On the Feeding Rhythms of Annual Spruce Seedlings in a Forest Nursery. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1979, no. 2, pp. 12–16.

7. Новосельцева А.И., Родин А.Р. Справочник по лесным питомникам. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 280 с.

Novoseltseva A.I., Rodin A.R. *Handbook of Forest Nurseries*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 280 p. (In Russ.).

8. Патент 131931 U1 РФ, МПК 2013.08 H05H 1/24 (2006.01). Импульсный генератор переохлажденной плазмы: № 2013110894/07: заявл. 13.03.2013; опубл. 27.08.2013, бюл. № 24 / К.В. Гостев, А.А. Тихомиров, Е.А. Тихонов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Плазмасфера».

Gostev K.V., Tikhomirov A.A., Tikhonov E.A. *Pulse Generator of Supercooled Plasma*. Patent RF, no. RU 131931, 2013. (In Russ.).

9. Юрьева А.Л., Гаврилова О.И., Хлюстов В.К. Динамика формирования надземной части культур сосны в период ранней диагностики // Тр. лесонинж. фак. ПетрГУ. 2008. № 7. С. 149–151.

Yurieva A.L., Gavrilova O.I., Khlyustov V.K. *Dynamics of the Formation of the Aboveground Part of Pine Crops During the Early Diagnosis*. Petrozavodskiy gosudarstvennyy universitet = Proceedings of the Faculty of Forestry and Engineering, 2008, no. 7, pp. 149–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2008.1871>

10. Akimov R.Yu., Ostroshenko V.V. The Seed Pelleting of Korean Cedar Pine (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) and Amur Larch (*Larix amurensis*). *Agrarnyy vestnik Primor'ya = Agrarian Bulletin of Primorye*, vol. 4, pp. 39–41. (In Russ.).

11. Bao D., Luoranen J., Lehto T., Himanen K., Silvennoinen M., Silvennoinen R., Repo T. Biophysical Changes in the Roots of Scots Pine Seedlings During Cold Acclimation and After Frost Damage. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 431, pp. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.008>

12. Goebel D.M., Forrester A.T. Plasma Studies on a Hollow Cathode, Magnetic Multipole Ion Source for Neutral Beam Injection. *Rev. Sci. Instrum*, 1982, vol. 53, iss. 6, pp. 810–815. <https://doi.org/10.1063/1.1137051>

13. Goebel D.M., Watkins R.M. High Current, Low Pressure Plasma Cathode Electron Gun. *Rev. Sci. Instrum*, 2000, vol. 71, iss. 2, pp. 388–398. <https://doi.org/10.1063/1.1150212>

14. Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Rempe N.G. Current Status of the Plasma Emission Electronics. I. Basic Physical Processes. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21, iss. 2, pp. 123–138. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212027>

15. Himanen K., Helenius P., Ylioja T., Nygren M. Intracone Variation Explains Most of the Variance in Picea Abies Seed Weight. Implications for Seed Sorting. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 470–477. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0379>

16. Himanen K. Seed Quality Attributes in Seedling Production of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Dissertationes Forestales*, 2018, vol. 261, 74 p. <https://doi.org/10.14214/df.261>

17. Lilja A., Himanen K. *Other Seed and Cone Diseases*. The American Phytopathology Society, 2018.

18. Miransari M., Smith D.L. Plant Hormones and Seed Germination. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, vol. 99, pp. 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.005>

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