

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

4

2026

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, Скиннгаттеберг)
КОМАРОВА А.М. – отв. секретарь, канд. с.-х. наук (Россия, Архангельск)

Бессчетнова Н.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
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)
Казаков Я.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Коновалов В.Ф., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Уфа)
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)
Щекалев Р.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

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

4

2026

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)

Besschetnova N.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
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)
Kazakov Ya.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Konovalov V.F., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Ufa)
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)
Sigurdsson 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)
Shchekalev R.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

G.A. Kumarasekara, Ch. Muthumala, T.D. Amarasinghe, F. Marikar. Influence of Physical and Environmental Factors on Yield Prediction Variability in Sri Lankan <i>Pinus</i> Plantations.....	9
A.K. Габделхаков, И.И. Фазлутдинов, В.Ф. Коновалов, М.В. Мартынова, С.И. Гарфутдинова. Распределение диаметров деревьев разновозрастных древостоев липы мелколистной	20
A.C. Ильинцев, Е.Н. Наквасина, А.Г. Волков, А.П. Богданов. Влияние почвенных свойств на подрост <i>Picea abies</i> (L.) Karst. × <i>P. obovata</i> (Ledeb.) при лесовозобновлении на сплошной вырубке в средней подзоне тайги Архангельской области.....	35
A.Г. Молчанов. Зависимость скорости фотосинтеза и транспирации <i>Pinus sylvestris</i> L. и <i>Picea abies</i> L. от факторов среды	50
A.A. Красикова, М.А. Гусакова, Н.А. Неверов, М.В. Сурсо, С.С. Хвиузов, К.Г. Боголицын. Пирогенное воздействие на свойства древесины сосны в северной подзоне тайги	63
Г.Ю. Морозова, И.Д. Дебеляя, Л.А. Антонова, Е.М. Климина, А.В. Остроухов, К.В. Ионкин. Виталитетная структура древостоев природного парка «Питомник им. Лукашова».....	77
С.Н. Тарханов, Е.А. Пинаевская, Ю.Е. Аганина, А.С. Пахов. Изменчивость фотосинтетического пигментного комплекса ели с разной формой семенных чешуй в северной подзоне тайги Архангельской области	96
Н.М. Кузьмина. Повышение аттрактивности рекреационных комплексов декоративными экзотическими растениями	110
A.A. Карбасников, Е.Б. Карбасникова, О.С. Залывская. Пигментный комплекс ассимиляционного аппарата интродуцентов в Вологодской области.....	123

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

С.В. Посыпанов, К.В. Козлов, С.П. Карпачев. Пенетрационная характеристика грунтозацепов мобильных лесосплавных опор.....	133
--	-----

<i>С.В. Шлычков.</i> Анизотропия и диссипативные свойства древесины	145
<i>А.А. Федотов, Т.Н. Вахнина, И.В. Сусоева, А.А. Титунин.</i> Структура и прочностные характеристики фанеры на модифицированном связующем	157

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

<i>А.А. Громов, М.С. Иванов, П.Д. Алексеев, П.А. Марьяндышев.</i> Комплексный термический анализ торрефиката из древесины лиственницы..	171
<i>В.В. Медведев, Ю.В. Севастьянова, А.В. Гурьев, А.В. Поташев, А.С. Лыжина, А.В. Скорнякова.</i> Образование минеральных отложений в варочных установках «Камюр».....	181

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

<i>М.Д. Мерзленко, В.А. Брынцев, А.А. Коженкова.</i> Возрастные изменения участия деревьев разных классов Крафта в структуре культур <i>Picea abies</i> (L.).....	193
<i>А.В. Кузнецов, О.Н. Галактионов, А.А. Селиверстов, А.А. Гайда.</i> Эффективность автоматизации систем управления харвестеров.....	201





CONTENTS

FORESTRY

- G.A. Kumarasekara, Ch. Muthumala, T.D. Amarasinghe, F. Marikar.* Influence of Physical and Environmental Factors on Yield Prediction Variability in Sri Lankan *Pinus* Plantations..... 9
- A.K. Gabdelkhakov, I.I. Fazlutdinov, V.F. Konovalov, M.V. Martynova, S.I. Garfutdinova.* Distribution of Tree Diameters in Mixed-Age Stands of Small-Leaved Linden 20
- A.S. Ilintsev, E.N. Nakvasina, A.G. Volkov, A.P. Bogdanov.* The Effect of Soil Properties on the Seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in Reforestation at Clear-Cutting in the Middle Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region 35
- A.G. Molchanov.* The Effect of Environmental Factors on Photosynthesis and Transpiration Rates in *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* L. 50
- A.A. Krasikova, M.A. Gusakova, N.A. Neverov, M.V. Surso, S.S. Khviyuzov, K.G. Bogolitsyn.* Pyrogenic Impact on the Properties of Pine Wood in the Northern Taiga Subzone 63
- G.Yu. Morozova, I.D. Debelaya, L.A. Antonova, E.M. Klimina, A.V. Ostroukhov, K.V. Ionkin.* Vitality Structure of Tree Stands in the Lukashov Nursery Nature Park 77
- S.N. Tarkhanov, E.A. Pinaevskaya, Yu.E. Aganina, A.S. Pakhov.* Variability of the Photosynthetic Pigment Complex in Spruce Trees with Different Seed Scale Shapes in the Northern Taiga of the Arkhangelsk Region 96
- N.M. Kuzmina.* Increasing the Attractiveness of Recreational Complexes with Ornamental Exotic Plants 110
- A.A. Karbasnikov, E.B. Karbasnikova, O.S. Zalyvskaya.* The Pigment Complex of the Assimilation Apparatus of Introduced Species in the Vologda Region..... 123

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

- S.V. Posypanov, K.V. Kozlov, S.P. Karpachev.* Penetration Properties of Ground Lugs of Portable Supports for Timber Rafting 133

<i>S.V. Shlychkov</i> . Anisotropy and Dissipative Properties of Wood.....	145
<i>A.A. Fedotov, T.N. Vakhnina, I.V. Susoeva, A.A. Titunin</i> . Structure and Strength Properties of Plywood with Modified Binder	157

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

<i>A.A. Gromov, M.S. Ivanov, P.D. Alekseev, P.A. Maryandyshev</i> . Comprehensive Thermal Analysis of Torrefied Larch Wood	171
<i>V.V. Medvedev, Yu.V. Sevastyanova, A.V. Guriev, A.V. Potashev, A.S. Lyzhina, A.V. Skornyakova</i> . Formation of Mineral Deposits in Kamur Digesters ..	181

BRIFF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

<i>M.D. Merzlenko, V.A. Bryntsev, A.A. Kozhenkova</i> . Age-Related Changes in the Participation of Trees of Different Kraft Classes in the Structure of <i>Picea abies</i> (L.) Plantations	193
<i>A.V. Kuznetsov, O.N. Galaktionov, A.A. Seliverstov, A.A. Gaida</i> . The Effectiveness of Automation in Harvester Control Systems.....	201



Original article

УДК 630*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-9-19

Influence of Physical and Environmental Factors on Yield Prediction Variability in Sri Lankan *Pinus* Plantations

Gihan Amila Kumarasekara¹, PhD; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7045-4685>

Chaminda Muthumala¹, PhD; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-7717>

Tharindu Dilan Amarasinghe², PhD; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6073-8275>

Faiz Marikar³✉, Director; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4579-7263>

¹Research Development and Training Division, State Timber Corporation, Battaramulla, Sri Lanka; kumara@stc.ac.lk, ck_muthumala@yahoo.com

²Department of Natural Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Tokyo, Japan; amarasinghe@uot.edu.jp

³General Sir John Kotelawala Defence University, Ratmalana, Sri Lanka; faiz@kdu.ac.lk✉

Received on December 14, 2025 / Approved after reviewing on February 26, 2026 / Accepted on February 27, 2026

Abstract. This study investigates the influence of slope and agro-ecological regions on the growth and timber volume of *Pinus* plantations in the wet and intermediate zones of Sri Lanka. Annually, the Forest Department of Sri Lanka releases approximately 1,000 hectares of *Pinus* plantations for thinning and clear felling to the State Timber Corporation, which estimates timber yield using enumeration data. Notable discrepancies between estimated and actual timber volumes prompted a detailed analysis of the physical and environmental factors affecting plantation growth. The study covered 48 coupes from 11 plantations across three districts Nuwara Eliya, Matara, and Ratnapura selected based on regional representation. Data collected included actual timber volumes extracted in 2020 and 2021, slope measurements, standing tree counts, and agro-ecological region classifications. Statistical analysis focused on identifying correlations between slope, agro-ecological regions, and recorded timber volume. Results indicated a predominantly negative correlation between slope and timber volume, with volumes decreasing progressively from up-country to low-country regions. Steeper slopes were consistently associated with reduced timber yields, while agro-ecological zone significantly influenced overall plantation productivity across all sampled sites. These findings highlight the importance of incorporating topographical and ecological factors into timber yield forecasting models. Improved integration of such variables would reduce estimation discrepancies, support more accurate harvest planning, and contribute to the long-term sustainable management of forest plantation resources across Sri Lanka.

Keywords: pine, *Pinus*, *Pinus* growth, slope impact on wood increment, agro-ecological regions, timber volume, Sri Lankan plantations

For citation: Kumarasekara G.A., Muthumala Ch., Amarasinghe T.D., Marikar F. Influence of Physical and Environmental Factors on Yield Prediction Variability in Sri Lankan *Pinus*



Plantations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 9–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-9-19>

Научная статья

Влияние физических и экологических факторов на изменчивость прогнозируемой урожайности на сосновых плантациях Шри-Ланки

Г.А. Кумарасекара¹, науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7045-4685>

Ч. Мутумала¹, д-р наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-7717>

Т.Д. Амарасинге², д-р наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6073-8275>

Ф. Марикар³✉, директор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4579-7263>

¹Отдел исследований, развития и обучения, Государственная лесопромышленная корпорация, г. Баттарамулла, Шри-Ланка; ck_muthumala@yahoo.com

²Кафедра естественных наук и экологии Высшей школы инновационных исследований Токийского университета, г. Токио, Япония; amarasinghe@uot.edu.jp

³Университет обороны имени генерала сэра Джона Котелавалы, г. Ратмалана, Шри-Ланка; faiz@kdu.ac.lk✉

Поступила в редакцию 14.12.25 / Одобрена после рецензирования 26.02.26 / Принята к печати 27.02.26

Аннотация. Изучено влияние уклона местности и отнесенности территории к агроэкологическому региону на рост и объем древесины сосновых плантаций во влажных и переходных зонах Шри-Ланки. Департамент лесного хозяйства Шри-Ланки ежегодно выделяет Государственной лесопромышленной корпорации около 1000 га сосновых плантаций для проведения рубок ухода и сплошных рубок. На основе данных лесной таксации корпорация рассчитывает выход древесины. В связи со значительными расхождениями между расчетными и фактическими объемами древесины был проведен анализ физических и экологических факторов, влияющих на рост насаждений. Исследование охватило 48 участков на 11 плантациях в 3 районах Шри-Ланки: Нувара-Элия, Матара и Ратнапура, – выбранных на основе региональной репрезентативности. Полученные данные включали фактические объемы заготовленной древесины в 2020 и 2021 гг., результаты измерений угла склона местности, сведения о количестве живых деревьев и классификацию агроэкологических регионов. Методом статистического анализа была установлена корреляция между уклоном, отнесенностью территории к агроэкологическому региону и учетным объемом древесины. Отмечена преимущественно отрицательная корреляция уклона склона и выхода древесины, причем выход древесины постепенно уменьшался по мере перехода от горных районов к равнинным. Более крутые склоны всегда обуславливали снижение выхода древесины, в то время как агроклиматическая зона оказывала существенное влияние на общую продуктивность насаждений на всех исследованных участках. Полученные данные подчеркивают важность топографических и экологических факторов в моделях прогнозирования выхода древесины. Более полный учет этих факторов позволит сократить погрешности в расчетах, обеспечит более точное планирование лесозаготовок и будет способствовать долгосрочному рациональному лесопользованию в Шри-Ланке.

Ключевые слова: сосна, *Pinus*, рост сосны, влияние склонов на прирост древесины, агроэкологические регионы, объем древесины, плантации Шри-Ланки

Для цитирования: Кумарасекара Г.А., Мутумала Ч., Амарасинге Т.Д., Марикар Ф. Влияние физических и экологических факторов на изменчивость прогнозируемой урожайности на сосновых плантациях Шри-Ланки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 9–19. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-9-19>

Introduction

Pinus trees were first introduced to Sri Lanka in 1870, with plantations beginning around 1920. Initially, *Pinus patula* was cultivated in mountainous regions above 1,600 meters but on a limited scale. By the early 1950s, *Pinus caribaea* was introduced and cultivated in areas above 900 meters [1, 6]. The 1960s saw a rapid expansion of *Pinus* plantations in the mountainous regions, reaching approximately 2,300 hectares by 1983. Globally, there are about 122 species of *Pinus*, and this conifer native to Central America now covers around 15,000 hectares of cultivated land in Sri Lanka [12].

The Forest Department of Sri Lanka currently manages about 93,000 hectares of forest plantations, of which 75,000 hectares are harvestable. Among these, 21,000 hectares consist of mature *Pinus* plantations established around 1970. The demand for *Pinus* construction timber is high, reaching 1.6 million cubic meters in 2018, driven partly by the tree's relatively uniform shape which enhances its market appeal [14].

The Forestry Sector Master Plan (1995–2020) was developed to guide sustainable forest management in Sri Lanka, ensuring continued ecosystem services [15, 18]. *Pinus caribaea* wood is particularly suitable for producing sawn wood, laminations, plywood, particleboard, and MDF. Finger jointing, a woodworking technique used to minimize timber waste, is often applied to softwoods like *Pinus*, which has gained popularity in furniture manufacturing due to its fresh appearance and environmental benefits [11, 16, 19].

Pinus wood contains significant amounts of turpentine due to resin tissues, which can reinforce the wood structure internally but may reduce bonding strength and paint adhesion. Therefore, the physical and structural properties of *Pinus* must be carefully considered in furniture design and production to optimize aesthetics and functionality.

A survey by the State Timber Corporation identified Teak, Mahogany, and Satin as the main timber species used for furniture in Sri Lanka, with no notable use of *Pinus* timber in this sector. This study aims to investigate the influence of terrain slope and agro-ecological zonation on the volume of *Pinus* trees and to provide recommendations for improving volume estimation methods for *Pinus* plantations in Sri Lanka.

Research Objects and Methods

Study Area. This study examines the relationship between the growth and yield of *Pinus* trees and the slope of the land within three key districts of Sri Lanka, Nuwara Eliya, Matara, and Ratnapura representing wet and intermediate agro-ecological zones. Plantations released in previous years, with similar ages, were selected to ensure consistency in the analysis. Forest block sizes were determined based on the extent of *Pinus* plantations in these districts during 2020 and 2021. This regional focus allows for an in-depth assessment of how topographical variations influence timber volume and growth patterns specific to these diverse ecological and climatic conditions (Fig. 1 and Table 1).

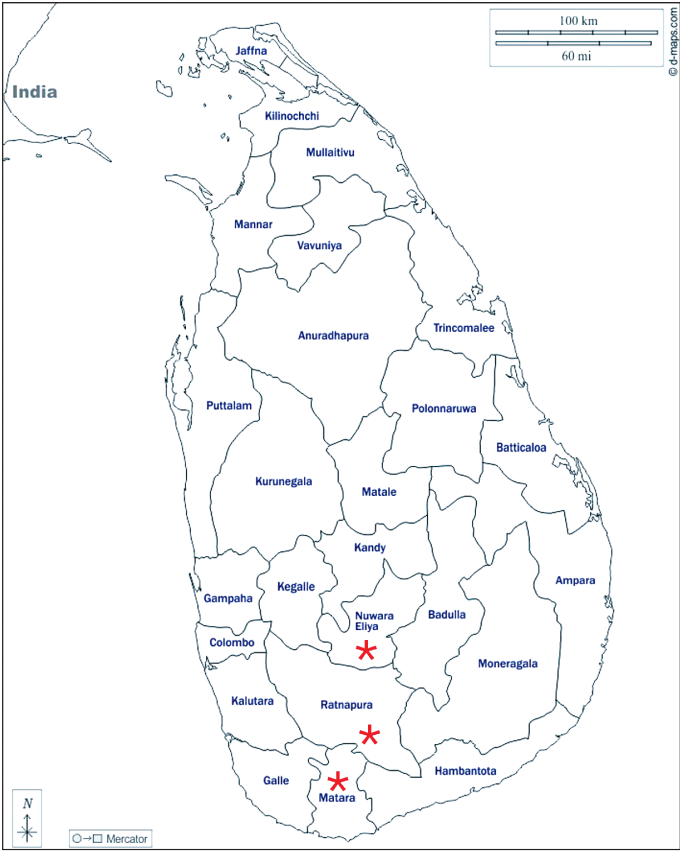


Fig. 1. Study Locations

Table 1

Allotments of the Forest Department in each of the selected districts

Region	Division	Range	Block
Nuwara Eliya	Nuwara Eliya	Halgranoia	Hanguranketha 02/002A
			Hanguranketha 02/003
		Hatton	Moragahahena 02/001
		Nuawara Eliya	Watawala
Matara	Matara	Kamburupitiya	Athuraliya 03/002A
		Deniyaya	Pasgoda 01/001
	Hambantota	Walasmulla	Kunumuldeniya 01/007
	Matara	Kamburupitiya	Lenabatuwa 01/001
Rathnapura	Kaluthara	Ingiriya	Hadapangoda 01/013
			Hadapangoda 01/010

Data Collection. Data for this study were gathered using both primary and secondary sources. Primary data included measurements of slope, GPS coordinates, and sampling conducted during field visits. Secondary data comprised enumerated tree volume records, plantation maps, and comprehensive tree inventories from the selected plantations.

Used Formula. The following equation is used to calculate the volume of the *Pinus* stand tree:

$$V = 0.000075 \cdot DBH^{(1.87185)} \cdot Height^{(0.91418)} \cdot (-4, 275) \cdot DBH^{(-2.83174)},$$

where, *V* – volume of a tree; *DBH* – diameter at breast height.

Data Collection and Analysis. Data from each plantation were systematically collected and presented in tabular form for clarity. Data were compiled and visualized through graphs to highlight trends. The average tree volume for each coupe was calculated, and slope measurements between coupes were taken using a clinometer. These values were organized into tables to support further analysis. Graphs illustrating the relationship between average tree volume and slope were produced. Statistical analysis was performed to assess the correlation between slope and average tree volume, with the correlation coefficient calculated accordingly. All data processing and analysis were carried out using Microsoft Office 2007 to ensure precision and clarity in presentation.

Results and Discussion

Analysis of 48 coupes across the Nuwara Eliya, Matara, and Ratnapura districts showed a clear negative relationship between slope gradient and average tree wood volume in *Pinus* plantations. In most locations (90.9 %), steeper slopes were linked to lower wood productivity. This trend was especially strong in Walasmulla and Hadapangoda, where the correlation coefficient was nearly perfect at *r* = −0.997, indicating that slope is a highly reliable predictor of tree volume under the specific conditions found there.

An exception to this pattern was found in Aberdeen, where the slope and tree volume showed a positive correlation (*r* = 0.44, *R*² = 0.92), suggesting different site dynamics in that area. Despite the moderate correlation coefficient, the high coefficient of determination (*R*² = 0.92) indicates that 92 % of the variance in tree volume could be explained by slope in this location, suggesting a genuine site-specific relationship rather than random variation. This anomalous pattern warrants further investigation to identify the underlying environmental, edaphic, or management factors that may differentiate Aberdeen from other study locations.

The relationship between slope and tree wood volume exhibited considerable variation across the three study districts, reflecting the influence of distinct agro-ecological conditions on *Pinus* plantation productivity (Table 2).

Table 2

District-wise summary				
District	Locations	Avg. correlation	Range	Dominant trend
Nuwara Eliya	5	−0.445	[−0.988, 0.443]	Negative
Matara/Hambantota	4	−0.845	[−0.997, −0.40]	Strong negative
Ratnapura/Kaluthara	2	−0.994	[−0.997, −0.99]	

In the Nuwara Eliya district, representing the up-country wet zone, five locations were studied, showing an average correlation coefficient of *r* = −0.445. The correlation values varied widely, from *r* = −0.988 to 0.443, highlighting considerable spatial variation in how slope relates to tree volume. This suggests that other factors, such as microclimate, soil depth, or elevation-driven temperature differences, may have a stronger influence on tree productivity in this high-altitude region.

By contrast, the Matara and Hambantota districts, which fall within the low-country wet and intermediate zones, showed a more consistent and stronger negative correlation. Analysis across four locations revealed an average correlation of $r = -0.845$, with values ranging between $r = -0.997$ and $r = -0.40$. This stronger and more uniform relationship implies that slope plays a more decisive role in determining tree volume in these lower-elevation areas, potentially due to greater erosion risks from higher rainfall or variations in soil properties.

The Ratnapura and Kaluthara districts, also part of the low-country wet zone, exhibited the strongest and most consistent negative correlations between slope and tree volume. From two study locations, the average correlation was $r = -0.994$, with a narrow range from $r = -0.997$ to $r = -0.99$. This near-perfect negative correlation indicates that slope is a highly reliable predictor of tree productivity here, likely because the combination of steep terrain, heavy rainfall, and vulnerable soils makes slope the primary limiting factor for *Pinus* growth and wood accumulation.

The study covered six distinct agro-ecological regions as classified by Sri Lanka's Department of Agriculture, representing a range of climatic and soil conditions across montane and lowland zones where commercial *Pinus* plantations are established. These regions were selected to reflect the environmental diversity shaped by Sri Lanka's varied topography and rainfall patterns, both of which strongly affect forest plantation productivity. Timber volume productivity at the stand level, measured in cubic meters per hectare (m^3/ha), was calculated for all plantations within each agro-ecological zone using coupe harvest records (Table 3).

Table 3

Six agro-ecological regions

Agro-ecological region	Region	Block name	Volume of timber, m ³ /ha
WU1	Nuwara Eliya	Kiriamadeniya	459
WU2		Hanguranketha 02/002	511
			317
		Hanguranketha 02/003	316
WM1		Aberdeen 02/001	214
WL1	Matara	Puwakgahahena 01/001	310
	Rathnapura	Handapangoda 01/013	157
		Handapangoda 01/010	123
WL2	Matara	Athuraliya 03/002	155
		Lenabatuwa 01/001	170
I(L1-L3)		Kunumuldeniya 01/007	289

This spatial distribution of study sites across multiple agro-ecological regions enabled the examination of how macro-scale environmental factors including mean annual rainfall, temperature regimes, potential evapotranspiration, and soil moisture availability interact with topographic variables to influence *Pinus* growth dynamics. The agro-ecological classification system integrates climatic parameters (particularly rainfall seasonality and intensity), elevation zones (up-country Nuwara Eliya, mid-country Ratnapura, and low-country Matara), and moisture regime categories (wet, intermediate, and dry zones), providing a comprehensive framework for interpreting regional variation in plantation performance. By stratifying the analysis across these ecologically meaningful units, it becomes possible to distinguish be-

tween site-specific effects attributable to local topography (such as slope gradient) and broader regional patterns driven by climatic and physiographic factors that operate at the landscape scale (Fig. 2).

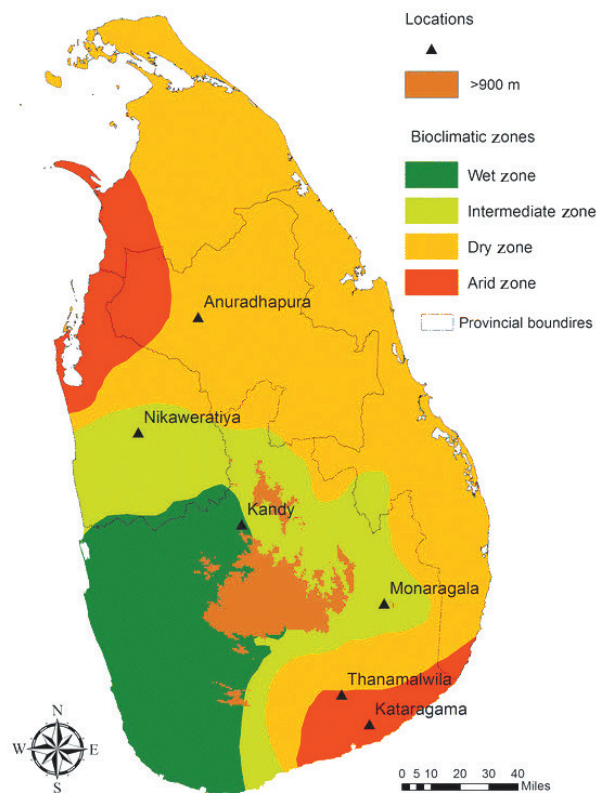


Fig. 2. Divisions of agro-ecological regions in Sri Lanka

A total of 54 sites derived from 48 harvested coupes were stratified across six agro-ecological regions based on the classification system of Hearath et al. 2023 [5], with the following spatial distribution: WM1 (Mid-country Wet zone, $n=5$), WU1 (Up-country Wet zone 1, $n=3$), WU2 (Up-country Wet zone 2, $n=29$), I(L1-L3) (Low-country Intermediate zone, $n=2$), WL1 (Low-country Wet zone 1, $n=9$), and WL2 (Low-country Wet zone 2, $n=6$). Linear regression analysis revealed zone-specific relationships between slope gradient and average individual tree volume. In the up-country wet zones, negative correlations dominated: WU1 showed a strong inverse relationship with an R^2 close to 1 ($p < 0.05$), while WU2 displayed a weaker but consistent negative trend with R^2 below 0.7. Similarly, WM1 had a robust negative correlation with high explanatory power ($R^2 \approx 1$). The intermediate zone I(L1-L3) exhibited a moderate negative correlation, though with lower predictive strength. In contrast, the low-country wet zones (WL1 and WL2) showed positive correlations between slope and tree volume. WL1 demonstrated a strong positive relationship ($R^2 > 0.9$), and WL2 maintained a weaker but steady positive trend ($R^2 < 0.7$). This divergence in slope-volume relationships between highland and lowland zones suggests fundamental differences in limiting factors governing *Pinus* productivity, with moisture availability, soil depth distribution along slope gradients, and erosion susceptibility potentially varying systematically with elevation and rainfall

regime, thereby altering the functional impact of topographic position on stand-level biomass accumulation (Fig. 3).

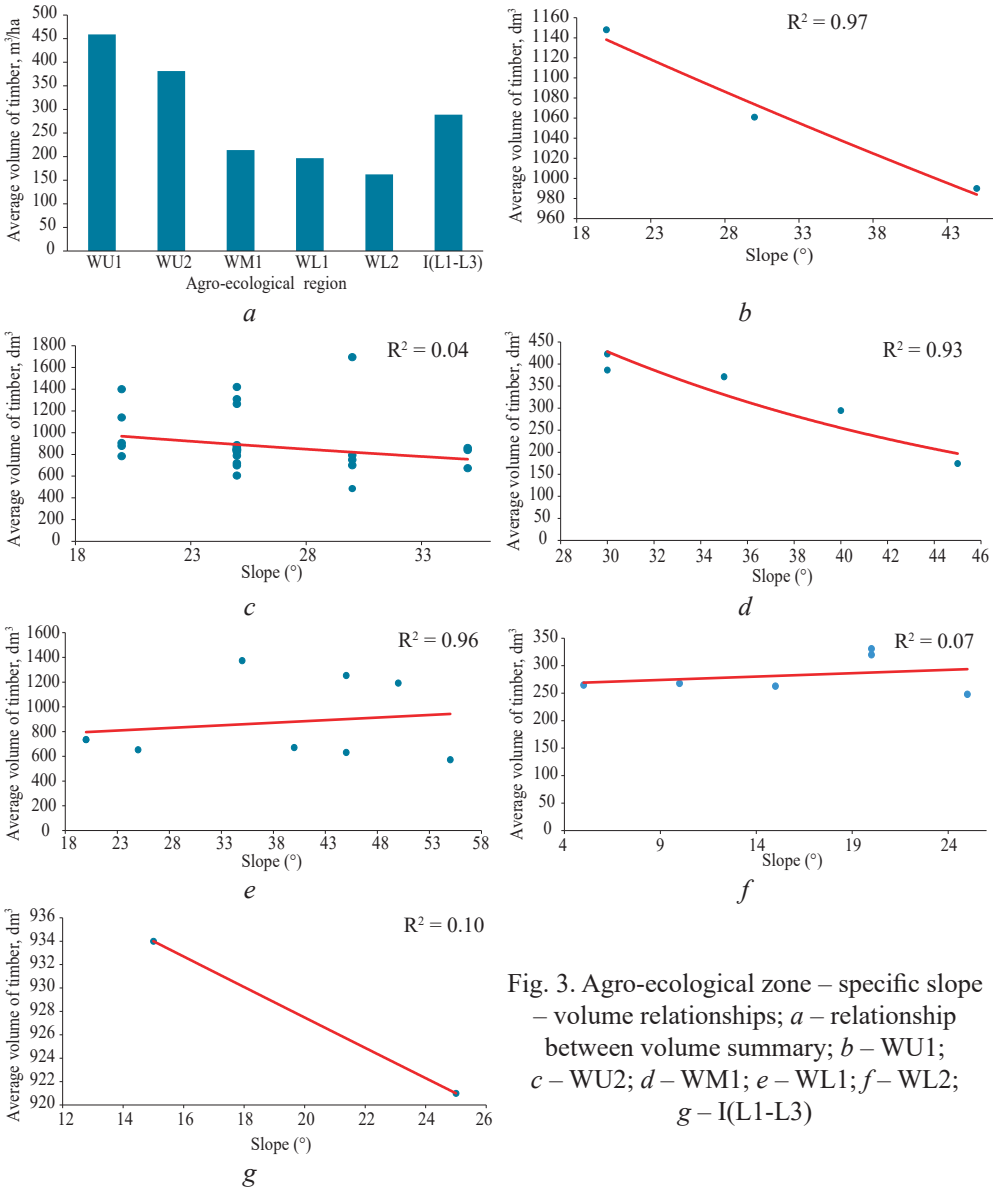


Fig. 3. Agro-ecological zone – specific slope – volume relationships; *a* – relationship between volume summary; *b* – WU1; *c* – WU2; *d* – WM1; *e* – WL1; *f* – WL2; *g* – I(L1-L3)

The analysis of 48 coupes across the Nuwara Eliya, Matara, and Ratnapura districts demonstrates a predominantly negative association between slope gradient and average tree wood volume in *Pinus* plantations, with 90.9 % of locations displaying this inverse relationship. This finding aligns with ecological and silvicultural research indicating that steeper slopes often present more challenging conditions for tree growth due to factors such as shallow soil depth, increased erosion, reduced nutrient availability, and difficulty in water retention [9, 20]. These limitations can restrict root expansion and resource uptake, ultimately reducing tree biomass accumulation and wood volume. The near-perfect negative correlation observed in Walasmulla and Hadapangoda ($r = -0.997$) underscores the critical influence of slope on productivity where these site-specific conditions are amplified.

Such strong slope-volume relationships have been reported in other mountainous forest ecosystems, where the slope acts as an abiotic stressor adversely affecting tree growth [13, 17]. The impact of slope-related stresses plays a crucial role in forest management, highlighting the need to incorporate topographical data into yield prediction models to optimize wood production in plantation forestry.

In contrast, the positive correlation found in Aberdeen ($r = 0.44$, $R^2 = 0.92$) challenges this general trend, suggesting that local conditions may alter or even reverse the usual negative effects of slope on growth. The strong explanatory power of slope in this area points to specific environmental or management factors, such as soil characteristics, microclimate, slope orientation, or forestry practices like thinning, species choice, or soil treatments, that could improve productivity on steeper slopes.

This anomalous pattern in Aberdeen is consistent with findings in some forestry research where positive growth responses are attributed to improved drainage on slopes, better sunlight exposure depending on aspect, or adaptive silvicultural interventions [8]. Hence, further detailed investigation incorporating soil physico-chemical properties, microclimatic data, and management history is necessary to disentangle the drivers of this relationship and to refine silvicultural recommendations tailored to local conditions [2].

The relationship between slope and tree wood volume shows marked variability across the three districts studied (Nuwara Eliya, Matara-Hambantota, and Ratnapura-Kaluthara) reflecting the diverse agro-ecological settings and their impact on *Pinus* plantation productivity. Within the up-country wet zone of Nuwara Eliya, the wide range of correlation values from strongly negative ($r = -0.988$) to moderately positive ($r = 0.443$) indicates that slope alone does not fully account for variations in tree volume. This aligns with ecological research emphasizing the complex influences on tree growth in high-elevation ecosystems, where microclimatic variables like temperature fluctuations, soil depth, and moisture availability significantly affect outcomes. Elevation-related temperature gradients may also impact physiological processes such as photosynthesis and respiration, influencing biomass accumulation independently of slope.

In contrast, the lowland districts of Matara and Hambantota exhibit a more pronounced and consistent negative relationship between slope and wood volume. The stronger average correlation ($r = -0.845$) with less spatial variability points to the dominant role of slope-induced erosion and soil degradation exacerbated by higher rainfall intensity typical of these agro-ecological zones [7]. Soil erosion on steep slopes reduces nutrient availability and rooting volume, constrained further by soil texture and organic matter content representatives of these low-country wet and intermediate zones [4]. The findings are consistent with regional forestry reports emphasizing slope as a critical factor limiting plantation productivity due to accelerated surface runoff and sediment loss in these areas [3].

The Ratnapura and Kaluthara districts, with their robust and narrowly ranged strong negative correlations (average $r = -0.994$), affirm that topographic gradients represent the principal limiting factor for *Pinus* growth under the combined influence of steep terrain, high rainfall, and susceptible soil conditions [10]. This corroborates landscape-scale studies from tropical wet zone forests pointing to the amplification of slope effects where geophysical attributes and climatic variables synergize to hinder tree volumetric growth. In such contexts, slope not only impacts soil moisture dynamics and nutrient cycling but also physical stability, making it the most reliable predictor of plantation productivity.

Conclusion

The study confirms that slope gradient significantly impacts the growth and volume of *Pinus* trees, with an evident inverse relationship between slope steepness and tree volume. While the basal area per hectare and stump surface area remains relatively constant across slopes, the reduction in tree height on steeper slopes primarily drives decreased wood volume. This height reduction is likely influenced by diminishing sunlight availability on steeper slopes, which restricts photosynthetic capacity and subsequently growth. Furthermore, regional agro-ecological differences shape *Pinus* productivity, with higher volumes typically seen in the Wet Zone Up-country compared to the Intermediate Zone. This pattern reflects the combined effects of climatic factors like rainfall and temperature alongside topographical influences.

Limitations of the Study. Limitations of the study include potential inaccuracies in timber volume estimates due to variability in tree age and height, despite the characteristic sigmoidal growth pattern of *Pinus* species. Additionally, the relatively small sample area restricts the ability to generalize findings across all *Pinus* plantations in Sri Lanka. Furthermore, the study focused primarily on slope and agro-ecological region effects, leaving out other influential biotic and abiotic factors such as soil texture, nutrient availability, and silvicultural management practices which may significantly affect tree volume outcomes.

Future Research Directions. Future studies should broaden spatial coverage to include all major *Pinus* growing districts in Sri Lanka to capture wider agro-ecological diversity. Comprehensive analyses incorporating additional growth determinants such as soil properties, microclimate variations, nutrient status, and specific management regimes are essential to develop more robust growth and volume prediction models. Such research will enable finer-scale adaptation of plantation management to optimize wood productivity under varying environmental constraints.

REFERENCES

1. Ashton P.M.S., Gamage S., Gunatilleke I.A.U.N., Gunatilleke C.V.S. Restoration of a Sri Lankan Rainforest: Using Caribbean Pine *Pinus caribaea* as a Nurse for Establishing Late-Successional Tree Species. *Journal of Applied Ecology*, 1997, vol. 34, no. 4, pp. 915–925. <https://doi.org/10.2307/2405282>
2. D'Amato A.W., Jokela E.J., O'Hara K.L., Long J.N. Silviculture in the United States: An Amazing Period of Change over the Past 30 Years. *Journal of Forestry*, 2018, vol. 116, iss. 1, pp. 55–67. <https://doi.org/10.5849/JOF-2016-035>
3. Dilrukshi R.P.W.A., Hettiarachchi M.H.S.M., Sriskumar S., Chandrasekara E.D.C.T., Dissanayake D.M.M.R., Wijerathna R.M.S. Precision Agricultural Technologies for Enhancing Crop Productivity: A Way Forward to Sri Lankan Agriculture. *Sri Lanka Journal of Food and Agriculture*, 2021, vol. 7, iss. 2, pp. 23–42. <https://doi.org/10.4038/sljfa.v7i2.98>
4. Eshetu M., Wogi L., Demissie N. Soil Fertility Assessment and Mapping under Different Land Use Types Along Toposequence at Danka Watershed in Dinsho Districts of Bale Highland Oromia, Southeastern Ethiopia. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2024, vol. 36, iss. 5, pp. 847–872. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2024/v36i54582>
5. Hearath H.M.B.S., Pushpakumara D.K.N.G., Hewson M., Wickramagamage P. A Geospatial and Socio-Economic Assessment of Tree Density in Home Gardens as Trees Outside Forests Sources in Agro-Ecological Regions: Upper Mahaweli Catchment, Sri Lanka. *Tropical Agricultural Research*, 2023, vol. 34, iss. 3, pp. 212–226. <https://doi.org/10.4038/tar.v34i3.8647>

6. Jayawardhane J., Gunaratne A.M.T.A. Restoration Success Evaluation of a Thinned and Enriched Pine Plantation in Sri Lanka. *Journal of Tropical Forest Science*, 2020, vol. 32(4), pp. 402–413. <https://doi.org/10.26525/jtfs2020.32.4.402>
7. Karunaratne A.S., Wimalasiri E.M., Piyathilake U., Gunatilake S.K., Muttill N., Rathnayake U. Modelling Potential Soil Erosion and Sediment Delivery Risk in Plantations of Sri Lanka. *Soil Systems*, 2022, vol. 6, iss. 4, art. 97. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040097>
8. Kim J., Ahn J., Kang J. *Analysis of Wildfire Spread and Development of Efficient Adaptation Plan for Natural Recreation Forests: A Case Study of Gangwon-Do, South Korea*. South Korea, 2023. 44 p. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4581281>
9. Liu J. Progress in Research on the Effects of Environmental Factors on Natural Forest Regeneration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2025, vol. 8, art. 1525461. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1525461>
10. Malaviarachchi M.A., Karunathilake W.A., Perera R.A., Nijamudeen M.S. Threats and Related Research Towards Adaptation of Other Field Crops to Climate Change in the Dry Zone of Sri Lanka. *Proceedings of the Workshop on Present Status of Research Activities on Climate Change Adaptations*. Ed. by B. Marambe. Colombo, Sri Lanka, Council for Agricultural Research Policy, 2019, pp. 21–29.
11. Muthumala C.K., De Silva S., Alwis P.L.A.G., Arunakumara I.K.K.U., Mari-kar F.M.M.T. Assessment of Quality Parameters of Finger-Jointed Timber Products: A Review. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II*, 2025, vol. 18(67), pp. 65–82. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.1.5>
12. Nandasena W.D.K.V., Brabyn L., Serrao-Neumann S. Monitoring Invasive Pines Using Remote Sensing: A Case Study from Sri Lanka. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, vol. 195, art. 347. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10919-1>
13. Rishmawi K., Huang C., Zhan X. Monitoring Key Forest Structure Attributes Across the Conterminous United States by Integrating GEDI LiDAR Measurements and VIIRS Data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13(3), art. 442. <https://doi.org/10.3390/rs13030442>
14. Smith N.J.P., Williams J.T., Plucknett D.L., Talbot J.P. *Tropical Forests and Their Crops*. Ithaca, Cornell University Press, 2018. 584 p.
15. *Sri Lanka Forestry Sector Master Plan (FSMP)*. Battaramulla, Sri Lanka, Forestry Planning Unit, Ministry of Agriculture, Lands & Forestry, 1995.
16. Subasinghe S.M.C.U.P., Haripriya A.M.R. Prediction of Stem Biomass of *Pinus caribaea* Growing in the Low Country Wet Zone of Sri Lanka. *Journal of Tropical Forestry and Environment*, 2014, vol. 4, no. 1, pp 40–49. <https://doi.org/10.31357/jtfe.v4i1.1056>
17. Zhang C., Zeng F., Zeng Z., Du H., Su L., Zhang L., et al. Impact of Selected Environmental Factors on Variation in Leaf and Branch Traits on Endangered Karst Woody Plants of Southwest China. *Forests*, 2022, vol. 13(7), art. 1080. <https://doi.org/10.3390/f13071080>
18. Zhang X., Ke S., Xu T., Qiao D. Review of China's Forestry Industry over the Past 70 Years and an Outlook for the Future. *International Forestry Review*, 2020, vol. 22(2), pp. 269–282. <https://doi.org/10.1505/146554820829403496>
19. Zhang Y., Wang X.-P., Pan Y., Hu R., Chen N. Global Quantitative Synthesis of Effects of Biotic and Abiotic Factors on Stemflow Production in Woody Ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, vol. 30(8), pp. 1713–1723. <https://doi.org/10.1111/geb.13322>
20. Zhang Z., Du X., Wang F. Biological Activities of Procyanidins from the Bark of *Pinus caribaea* Morelet. *Natural Product Research*, 2009, vol. 23(8), pp. 696–703. <https://doi.org/10.1080/14786410802242984>

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

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

Научная статья

УДК 630.182.51+630.228.6+630.521.2+630.17+582.795(470.57)

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-20-34

Распределение диаметров деревьев разновозрастных древостоев липы мелколистной

А.К. Габделхаков[✉], канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [G-3023-2018](#),

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

И.И. Фазлутдинов², вед. специалист; ResearcherID: [C-9581-2019](#),

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

В.Ф. Коновалов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [G-2775-2018](#),

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

М.В. Мартынова¹, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [G-4659-2018](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-8425>

С.И. Гарфутдинова³, заведующий сектором; ResearcherID: [PGA-3926-2026](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4132-9410>

¹Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия;

aliya201199@mail.ru[✉], vfkonovalov@bk.ru, maaarussia@mail.ru

²Министерство лесного хозяйства Республики Башкортостан, г. Уфа, Россия;

solnc2007@yandex.ru

³Министерство земельных и имущественных отношений Республики Башкортостан,

г. Уфа, Россия; sabrina.shatskaya@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.04.25 / Одобрена после рецензирования 23.06.25 / Принята к печати 26.06.25

Аннотация. Оценка количественных характеристик лесного насаждения является исходным требованием стратегий планирования использования насаждения и лесоводственных мероприятий в нем. В число таких характеристик входит структурное разнообразие, которое может устанавливаться путем моделирования плотности вероятности распределения диаметров деревьев на высоте 1,3 м. Целью настоящего исследования стало описание структуры древостоя и подбор наиболее подходящей модели конечной смеси эмпирического распределения деревьев по диаметрам естественных разновозрастных древостоев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) центрально-восточной части Республики Башкортостан. Выполнен иерархический кластерный анализ полученных на 19 пробных площадях показателей деревьев методом Уорда и установлена пригодность методов 2-компонентных конечных смесей, основанных на гамма-распределении, распределении Вейбулла, логнормальном и скошено-нормальном распределении. Для подгонки моделей конечных смесей к данным о диаметре использовали алгоритм максимизации ожидания, реализованный в пакете ForestFit, разработанный для среды R. Все исследованные древостои отнесены к унимодальному типу, кривые структуры распределений по диаметру характеризовались скошенной, сложной и нерегулярной формами, бимодальных распределений М-образного типа с 2 пиками и нисходящих обратной J-образной формы не отмечено. Обнаружено, что смесь скошено-нормальной модели последовательно продемонстрировала наилучшую производительность с точки зрения показателей соответствия Колмогорова–Смирнова и Андерсона–Дарлингга, информационных критериев Акаике и Байеса для всех пробных площадей. Оценка относительных рангов качества соответствия позволила ранжировать конечные смеси

следующим образом: Вейбулла (3,5 – наихудшее соответствие), логнормальное распределение (3,2), гамма (2,9) и скошено-нормальное распределение (1,0). Таким образом, модель конечной смеси, основанная на скошено-нормальном распределении, может надежно аппроксимировать вероятности распределения диаметров разновозрастных древостоев липы мелколистной, обладает высокой гибкостью, эффективна с точки зрения баланса между точностью и сложностью. Модели конечной смеси одновременно позволяют оценить долю и частотное распределение деревьев разных возрастов и могут стать ключевым инструментом для перевода данных полевых измерений в динамические модели, прогнозирующие развитие леса.

Ключевые слова: диаметр на высоте 1,3 м, распределение по диаметру, моделирование диаметров, модель конечной смеси, скошено-нормальное распределение, липа мелколистная, *Tilia cordata* Mill., Республика Башкортостан

Для цитирования: Габделхаков А.К., Фазлутдинов И.И., Коновалов В.Ф., Мартынова М.В., Гарфутдинова С.И. Распределение диаметров деревьев разновозрастных древостоев липы мелколистной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 20–34.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-20-34>

Original article

Distribution of Tree Diameters in Mixed-Age Stands of Small-Leaved Linden

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

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

Vladimir F. Kononov¹, *Doctor of Agriculture, Prof.*; ResearcherID: [G-2775-2018](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2020-5540>

Maria V. Martynova¹, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [G-4659-2018](#), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8804-8425>

Sabrina I. Garfutdinova³, *Head of Sector*; ResearcherID: [PGA-3926-2026](#), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4132-9410>

¹Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia; aliya201199@mail.ru[✉], vfkononov@bk.ru, maaarussia@mail.ru

²Ministry of Forestry Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia; solnc2007@yandex.ru

³Ministry of Land and Property Regulations Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia; sabrina.shatskaya@yandex.ru

Received on April 19, 2025 / Approved after reviewing on June 23, 2025 / Accepted on June 26, 2025

Abstract. Identification and assessment of quantitative parameters of forest stands are initial requirements for planning strategies and options for forestry measures. These parameters include structural diversity, which can be determined by modeling the density of distribution probability of tree diameters at breast height of 1.3 m (*dbh*). The study aimed at describing the tree stand structure and selecting the most appropriate finite mixture model (FMM) of the empirical diameter distribution of natural mixed-age small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) stands in the central-eastern part of the Republic of Bashkortostan. We carried out

a hierarchical cluster analysis using Ward's method on tree parameters obtained from 19 sample plots, and determined the suitability of two-component finite mixture methods based on the gamma distribution, Weibull distribution, log-normal distribution, and skew-normal distribution. In order to fit the FMM to the diameter data, we used an expectation-maximization algorithm implemented in the ForestFit package, which was developed for the R environment. All the stands studied were classified as unimodal; the diameter distribution curves were described as skewed, complex, and irregular; no bimodal distributions of the M-shaped type with two peaks or downward-sloping inverted J-shaped distributions were observed. It was found that the mixture of the skew-normal model consistently demonstrated the best performance in terms of the Kolmogorov–Smirnov and Anderson–Darling goodness-of-fit statistics, as well as the Akaike and Bayes information criteria, for all sample plots. An assessment of the relative quality ranks of the correspondence allowed the finite mixtures to be ranked as follows: Weibull (3.5 – worst correspondence), log-normal distribution (3.2), gamma (2.9), and skew-normal distribution (1.0). Thus, an FMM based on a skew-normal distribution can reliably approximate the diameter distribution probabilities of small-leaved linden stands of mixed ages; it is highly flexible and offers an effective balance between accuracy and complexity. FMM allow the simultaneous estimation of the proportion and age distribution of trees and can serve as a key tool for converting field measurement data into dynamic models that predict forest development.

Keywords: diameter at a height of 1.3 m, diameter distribution, diameter modeling, finite mixture model, skew normal distribution, small-leaved linden, *Tilia cordata* Mill., Republic of Bashkortostan

For citation: Gabdelkhakov A.K., Fazlutdinov I.I., Konovalov V.F., Martynova M.V., Garfutdinova S.I. Distribution of Tree Diameters in Mixed-Age Stands of Small-Leaved Linden. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 20–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-20-34>

Введение

Распределение диаметров лесного насаждения является важной характеристикой, на ее основе можно оценить рост, запас насаждения, сортиментную структуру и спелость, определить стратегию планирования использования насаждения, варианты лесоводственных мероприятий в нем и др. [4, 5, 14]. Структура распределения диаметров выражается частотой диаметров деревьев и аппроксимирована функцией плотности вероятности (PDF) распределения. Для изучения свойств и управления насаждениями важно правильно подобрать PDF [9]. При рассмотрении разновозрастных древостоев здесь возникают трудности: эмпирические распределения диаметра являются асимметричными, многомодальными и имеют «толстый хвост», часто характеризуются случайными, локальными, нерегулярными и множественными режимами, которые отражают пики естественного возобновления в определенные промежутки времени и/или эпизодические выбросы роста отдельных деревьев, небольших групп деревьев после различного рода нарушений [13, 16, 17, 27]. Для моделирования PDF таких древостоев были предложены модели конечных смесей (FMM) [10, 27, 28].

Моделирование конечных смесей [10–12, 23, 26, 27] – это подход, применяемый для моделирования гетерогенных популяций, которые могут быть разделены на несколько однородных подгрупп (компонентов) [14]. Плотность

распределения конечной смеси K -компонент для случайной непрерывной величины x (например, диаметра дерева, высоты и т. д.) можно выразить как

$$g(x | \theta) = \sum_{k=1}^K \omega_k f(x | \theta_k),$$

где $g(x | \theta)$ – PDF распределения смеси моделей; $\theta = (\omega', \theta_1', \dots, \theta_k')$;

$f(x | \theta_k)$ – PDF распределения k -го отдельного компонента; $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_k)$ – вектор параметров смешивания отдельных компонентов в распределении смеси, который должен удовлетворять условию $0 \leq \omega_k \leq 1$, их сумма равна 1

(т. е. $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$) [23, 27].

В качестве компонентов PDF в исследованиях моделирования конечной смеси диаметров деревьев применяют распределения: Вейбулла [10, 11, 16, 28, 29]; гамма [7, 14, 16, 18]; нормальные [12, 14, 25]; логнормальные [14, 26, 27]; Гомперца [15], асимметрично- или скошено-нормальные [12, 21, 24], t -распределения и асимметричные t -распределения Стьюдента [12, 23, 24], экспоненциальные [20], гауссовы смеси [17].

В последние 25 лет FMM использовались для описания мультимодальной структуры древостоев со смешанными породами [10, 11, 28, 29], нарушенных насаждений [14, 15], распределений диаметров на высоте 1,3 м (dbh) разновозрастных насаждений [16, 18], имитационного моделирования и демонстрации производительности применяемого алгоритма FMM [21, 24, 27]. Исследования dbh -распределений разновозрастных насаждений липы редки [2, 3, 6].

Цель данного исследования – описать структуру древостоя и оценить способность аппроксимировать обобщенными моделями конечной смеси эмпирические распределения деревьев по диаметрам в естественных разновозрастных насаждениях липы мелколистной, произрастающих в центрально-восточной части Республики Башкортостан.

Объекты и методы исследования

Материал получен на 19 временных пробных площадях (ПП) размером 0,5–1,0 га, в естественных 2-возрастных насаждениях липы Архангельского лесничества Республики Башкортостан в 2019 и 2025 гг. ПП расположены между $54^{\circ}46'37''$ – $54^{\circ}6'28'96''$ с. ш. и $56^{\circ}57'858''$ – $56^{\circ}8'9764''$ в. д., на равнинных участках (склоны, чрезмерно сухие и влажные участки не рассматривались). Средняя высота исследованных территорий над уровнем моря составляет около 150 м. Климат резко континентальный, среднегодовая температура равняется 2–6 °С, годовое количество осадков – около 600 мм, из которых больше 1/2 приходится на вегетационный период, продолжающийся с мая по сентябрь.

Изученные древостои имеют порослевое происхождение, характеризуются II и III классами бонитета, сложной, 2-возрастной структурой с минимальным участием сопутствующих видов, относительная полнота – 0,4–1,0. На ПП для каждого элемента леса установлены при помощи мерной вилки $dbh > 6,9$ см с округлением до 1 см. Данные dbh были использованы для вычисления среднего квадратичного диаметра (DBH , см) и плотности (N , экз./га⁻¹) древостоев. За-

фиксированы высоты (h , м) учетных деревьев (случайным образом по 1–10 экз.) на каждую сантиметровую ступень толщины, по которым построены графики высот и рассчитаны средние для древостоя значения (H , м). Возраст каждого элемента леса древостоев (A , лет) определен путем подсчета колец на пнях срубленных деревьев и образцах кернов. Из множества переменных, полученных по данным ПП, в этом исследовании использовали только dbh .

Разделение эмпирических распределений dbh деревьев произведено с использованием иерархического кластерного анализа в программе Statistica. Кластеризация осуществлена методом Уорда с выбором в качестве меры Евклидова расстояния. Признаками кластеризации ПП были приняты частоты dbh -распределений по 4-сантиметровым ступеням толщины [1, 8].

Несгруппированные данные dbh проанализированы с использованием пакета ForestFit, разработанного для R [22]. Подгонка соответствия теоретическим моделям эмпирических распределений dbh деревьев осуществлялась с помощью ФММ, использующих следующие распределения: 2-параметрические гамма, логнормальное, Вейбулла и 3-параметрическое скошено-нормальное – число k -компонентов при этом принято 2. Для подгонки ФММ к данным 19 ПП применяли метод максимального правдоподобия с алгоритмом максимизации ожидания.

Функции плотности вероятности определяются следующим образом [22, 23]:

Вейбулла

$$f(x, \theta) = \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{(x - \mu)}{\beta} \right]^{(\alpha-1)} \exp \left\{ - \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right)^\alpha \right\};$$

гамма

$$f(x, \theta) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp \left\{ - \frac{x}{\beta} \right\};$$

логнормальное

$$f(x, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \mu}{\beta} \right]^2 \right\};$$

скошено-нормальное

$$f(x, \theta) = 2\phi \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right) \Phi \left(\alpha \frac{x - \mu}{\beta} \right),$$

где θ – вектор параметров семейства; α , β и μ – параметры формы, масштаба и местоположения; $\Gamma(\cdot)$ – обычная гамма-функция, определяемая как $\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{x-1} e^{-y} dy$ при $x > 0$; $\phi(\cdot)$ и $\Phi(\cdot)$ – функции плотности и распределения стандартного нормального распределения соответственно. Трехпараметрическое распределение Вейбулла при $\mu = 0$ упрощается до 2-параметрического [21–23].

Для сравнения и оценки моделей dbh -распределений использовались показатели соответствия: Колмогорова–Смирнова (KS) и Андерсона–Дарлинга (AD), информационные критерии Акаике (AIC) и Байеса (BIC). Меньшие значения этих показателей свидетельствуют о лучшем соответствии модели

[21–23]. Применение разных показателей обусловлено тем, что критерий AD более чувствителен к хвостам распределения, чем KS, а BIC по сравнению с AIC отдает предпочтение моделям проще, особенно при значительном объеме данных.

Ранжирование моделей конечных смесей выполнено с использованием относительного ранга [19]:

$$R_i = 1 + \frac{(m - 1)(S_i - S_{\min})}{(S_{\max} - S_{\min})},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; m – количество оцененных моделей (4); S_i – статистический показатель соответствия модели i ; $S_{\max}$ и $S_{\min}$ – максимальное и минимальное значения S_i соответственно.

Относительный ранг – это действительное число от 1 (наилучшее) до n (наихудшее). Для каждой FMM относительные ранги суммировались для 4 показателей соответствия.

Результаты исследования и их обсуждение

В исследованных насаждениях количество деревьев липы варьирует от 352 до 668 экз.·га⁻¹. В составе также присутствуют дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), вяз (*Ulmus glabra* Huds.), береза повислая (*Betula pendula* L.) и осина (*Populus tremula* L.). Доля сопутствующих видов в насаждениях изменяется от 4,5 до 13,5 %. Описательная статистика для ПП представлена в табл. 1. Исследованные древостои ПП характеризуются деревьями разного возраста, высоты и диаметра, образующими сложную структуру без четкого деления на ярусы. Возраст старшего элемента леса липы варьирует от 70 до 100 лет, младшего – от 50 до 85 лет, при этом разница в возрасте в пределах ПП составляет от 15 до 25 лет. DBH липы варьируют от 27 до 41 см – для старшего поколения и от 18 до 27 см – для младшего. Разница в H между поколениями липы не превышает в среднем 3,9 м (17 %). В общей сложности для всех видов средняя площадь поперечного сечения составила 34,03 м²·га⁻¹.

Таблица 1

Сводная статистика для таксационных показателей древостоев 19 ПП
Summary statistics for the stands' inventory parameters of 19 sample plots

Показатель	A, лет		H, м		DBH, см		N, экз.·га ⁻¹			G, м ² ·га ⁻¹			M, м ³ ·га ⁻¹		
							всего	в т. ч.		всего	в т. ч.		всего	в т. ч.	
	ЛП1	ЛП2	ЛП1	ЛП2	ЛП1	ЛП2		ЛП1	ЛП2		ЛП1	ЛП2		ЛП1	ЛП2
Минимум	70	50	21,9	17,7	27,1	17,6	352	156	160	18,45	11,80	5,33	187	122	52
Максимум	100	85	23,9	20,9	40,9	27,1	668	306	366	52,09	30,26	17,09	528	320	156
Среднее	88	70	22,7	18,8	34,0	22,3	527	224	277	34,03	20,23	10,90	342	212	99
S	9	10	0,6	1,0	3,9	2,6	88	39	55	7,61	4,45	3,12	78	48	30

Примечание: S – стандартное отклонение; G – сумма площадей сечений; M – запас; ЛП1 и ЛП2 – липа старшего и младшего возрастов соответственно.

Основные статистики обобщенных (по всем древесным породам) рядов dbh-распределений ПП представлены в табл. 2. Средние арифметические значения dbh и S варьируют от 22,2 до 32,4 и от 6,8 до 10,4 см соответственно.

Диаметр самых толстых деревьев достигает 66 см. Для всех исследованных участков *dbh*-распределения имеют положительную асимметрию и разную степень эксцесса. Для 7 ПП эксцесс отрицательный, что наравне с большими стандартными отклонениями указывает на усложнение возрастной структуры древостоев. Стандартизированные тесты на асимметрию и эксцесс, критерии хи-квадрат и Шапиро–Уилка с 95%-й вероятностью отклонили предположение о принадлежности ПП к нормальному *dbh*-распределению.

Таблица 2

Сводные статистические данные для диаметра на высоте 1,3 м древостоев 19 ПП
Summary statistics for the stands' *dbh* (cm) for 19 sample plots

Показатель	n	D	D _{min}	D _{max}	Me	FMo	Q _{low}	Q _{up}	S	As	Ex
Минимум	352	22,2	8	49	22	26	17	26	6,8	0,221	-0,631
Максимум	668	32,4	15	66	31	68	25	39	10,4	1,139	2,668
Среднее	527	27,4	11	58	26	43	21	33	8,5	0,653	0,552
S	88	2,9	2	5	3	12	2	4	1,0	0,262	0,968

Примечание: n – размер выборки, экз. · га⁻¹; D – среднее арифметическое значение; D_{min}, D_{max} – минимальное и максимальное значения соответственно; Me – медиана; FMo – частота по моде; Q_{low} и Q_{up} – нижний и верхний квартили соответственно; As – коэффициент асимметрии; Ex – коэффициент эксцесса.

В исследуемых насаждениях *dbh*-распределения характеризовались сильно скошенной и нерегулярно убывающей формой. Дендрорама, полученная по результатам иерархического кластерного анализа, четко показывает слияние 10 мелких кластеров в 4 крупных (рис. 1).

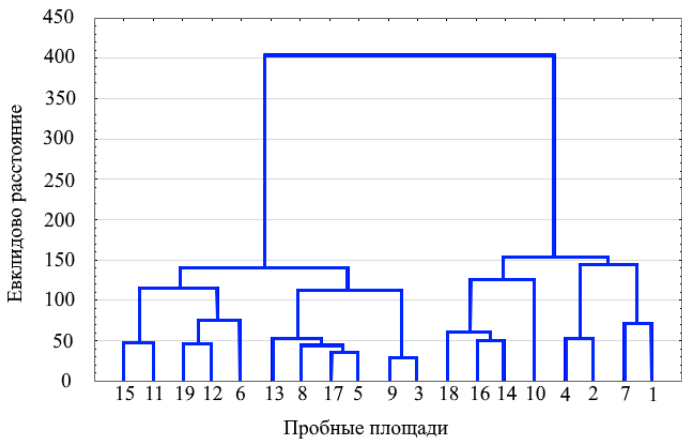


Рис. 1. Дендрограмма кластерного анализа *dbh*-распределений разновозрастных липняков

Fig. 1. Dendrogram of the cluster analysis of *dbh* distribution for mixed-age linden forests

Каждый кластер визуализирован отдельно (здесь приведены только наиболее характерные), что позволило все исследованные древостои отнести к унимодальному типу, кривые структуры *dbh*-распределений которых (рис. 2, 3) характеризуются следующим образом: 1) для ПП 1 и 7 с выраженной правосторонней асимметрией, 2 и 4 – неправильной формы; 2) для ПП 5, 8, 13 и 17 – неправильной формы, растянутые и правосторонне асимметричные, 3

и 9 – растянутые и плосковершинные с отрицательными E_x ; 3) для ПП 6, 11, 12, 15 и 19 – нерегулярные, растянутые, неправильной формы; 4) для ПП 10, 14, 16 и 18 – правосторонне-асимметричные распределения с As близким к 1,0. На 9 ПП dbh -распределения были прерывистыми. Среди исследованных древостоев бимодальных (М-образного типа с 2 пиками) и нисходящих (обратной J-образной формы) dbh -распределений не наблюдалось.

Анализ FMM и оценка их параметров проводятся при допущении определенного числа компонентов. Применение 2-компонентных FMM объясняется наличием деревьев 2 возрастов на исследованных ПП. Для нерегулярных эмпирических dbh -распределений и 2-возрастных древостоев использование 2-компонентных FMM является целесообразным [7, 15]. Однако если нет биологических или теоретических доказательств принадлежности популяции к смеси, то хорошее соответствие смеси 2 распределений не доказывает наличие 2 компонентов в распределении [26].

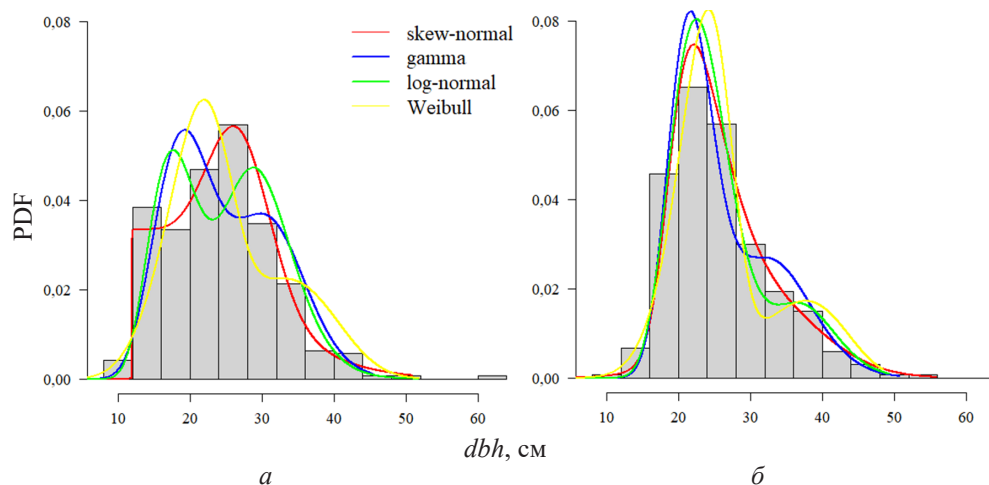


Рис. 2. Гистограммы данных dbh и PDF смеси скошено-нормальной (skew-normal, красная линия), гамма (gamma, синяя), логнормальной (log-normal, зеленая) и Вейбулла (Weibull, желтая) моделей для ПП: а – 6; б – 10

Fig. 2. Histograms of dbh data and probability density functions (PDF) for mixture of skew-normal (red line), gamma (blue line), log-normal (green line), and Weibull (yellow line) models for sample plots: а – 6; б – 10

Оценочные параметры рассматриваемых моделей смесей представлены в табл. 3. Различные значения параметров FMM ПП указывают на разницу в структуре лесных насаждений и могут зависеть от многих факторов, таких как возраст, плотность, тип леса, рубки ухода и др. В качестве примера на рис. 2 показаны относительная частота деревьев по ступеням толщины и принятые 4 FMM 2 ПП. Обе выборки данных демонстрируют скошенное распределение. Наиболее подходящими для описания распределения диаметров деревьев в данных выборках выступают FMM, использующие скошено-нормальное распределение и распределение Вейбулла, визуально лучше аппроксимируя форму гистограмм, а также наиболее точно повторяя пики и хвосты распределений. Большие различия между соседними классами dbh по N часто делают сложной аппроксимацию эмпирических распределений теоретическими (рис. 2, ПП 6). Для разновозрастных насаждений, характеризующихся близкими к унимодаль-

ным распределениям, трудность установления сходимости оценки FMM отмечают и другие исследователи [7, 10, 26].

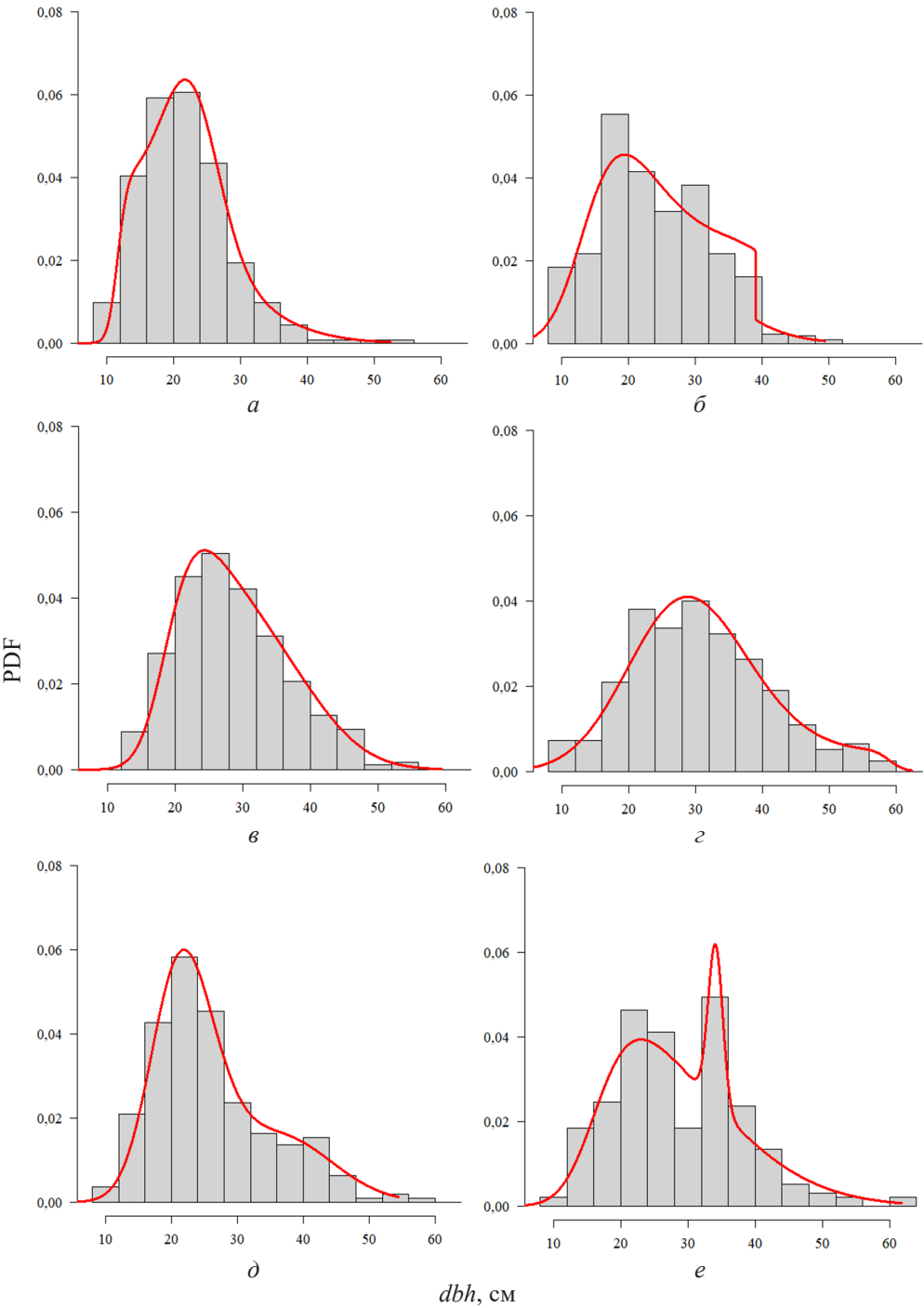


Рис. 3. Гистограммы данных *dbh* и PDF смеси скошено-нормальной модели для ПП: *a* – 1; *б* – 4; *в* – 8; *г* – 9; *д* – 10; *е* – 12

Fig. 3. Histograms of *dbh* data and PDF for the skew-normal mixture model for sample plots: *a* – 1; *б* – 4; *в* – 8; *г* – 9; *д* – 10; *е* – 12

Таблица 3

Параметры подгонки моделей конечной смеси к данным *dbh* для ПП
Fitting parameters for FMM to *dbh* data for sample plots

ПП	Распреде- ление	ω_1	ω_2	α_1	α_2	β_1	β_2	μ_1	μ_2
1	Вейбулла	0,52368	0,47632	4,61707	6,60050	30,17809	18,71384	—	—
	Гамма	0,62744	0,37256	25,14287	35,66596	0,72121	0,81287	—	—
	Логнор- мальное	0,54153	0,45847	—	—	0,19182	0,16861	2,83970	3,31405
	Скошено- нормаль- ное	0,62288	0,37712	11,13097	−0,07074	12,97701	4,18708	11,62862	22,79190
4	Вейбулла	0,45832	0,54168	6,23047	5,04576	34,67981	19,77159	—	—
	Гамма	0,43386	0,56614	41,39598	15,63631	0,77233	1,13372	—	—
	Логнор- мальное	0,42290	0,57710	—	—	0,15389	0,26752	3,45272	2,84279
	Скошено- нормаль- ное	0,16590	0,83410	−343,54137	2,87867	7,88423	12,10761	39,06376	13,35997
6	Вейбулла	0,40876	0,59124	5,07510	5,50088	34,90982	22,29857	—	—
	Гамма	0,38872	0,61128	44,19171	20,04844	0,72613	1,00540	—	—
	Логнор- мальное	0,51905	0,48095	—	—	0,15670	0,20924	3,40428	2,91133
	Скошено- нормаль- ное	0,40288	0,59712	−0,03484	928,26378	4,40359	14,30649	26,88800	11,95603
8	Вейбулла	0,42267	0,57733	6,68892	6,98308	39,69929	25,53128	—	—
	Гамма	0,33485	0,66515	59,06953	29,20456	0,64396	0,83108	—	—
	Логнор- мальное	0,37151	0,62849	—	—	0,13546	0,18328	3,60982	3,15505
	Скошено- нормаль- ное	0,19934	0,80066	−0,06300	3,31338	7,31553	11,15113	36,42580	18,75170
9	Вейбулла	0,41086	0,58914	6,19211	5,08511	44,55108	26,63560	—	—
	Гамма	0,42994	0,57006	37,59165	14,48649	1,07245	1,62240	—	—
	Логнор- мальное	0,41810	0,58190	—	—	0,16068	0,28535	3,68337	3,12221
	Скошено- нормаль- ное	0,91210	0,08790	1,14328	−9,63098	11,44097	16,02564	22,65759	59,04539
10	Вейбулла	0,27214	0,72786	6,57506	7,21354	38,61938	24,57506	—	—
	Гамма	0,34725	0,65275	39,36072	46,05380	0,86018	0,47932	—	—
	Логнор- мальное	0,16347	0,83653	—	—	0,11530	0,18131	3,63858	3,14694
	Скошено- нормаль- ное	0,65891	0,34109	2,66795	−0,03787	6,35733	8,22149	18,74834	31,86281
12	Вейбулла	0,47713	0,52287	5,84991	5,15330	23,75449	40,61829	—	—
	Гамма	0,44777	0,55223	40,81086	19,84911	0,92640	1,10498	—	—
	Логнор- мальное	0,56398	0,43602	—	—	0,23378	0,15163	3,06258	3,62020
	Скошено- нормаль- ное	0,10284	0,89716	−0,04239	3,82044	1,08471	15,74404	34,13024	16,30076

Окончание табл. 3

ПП	Распреде- ление	ω_1	ω_2	α_1	α_2	β_1	β_2	μ_1	μ_2
14	Вейбулла	0,66818	0,33182	6,04786	5,80900	23,36409	40,70642	—	—
	Гамма	0,72682	0,27318	23,26183	41,09617	0,93830	0,93359	—	—
	Логнор- мальное	0,26537	0,73463	—	—	0,15424	0,21369	3,63498	3,06148
	Скошено- нормаль- ное	0,31431	0,68569	−0,02850	1,13097	8,04338	6,05387	36,55395	18,47049

Гистограммы рис. 3 также демонстрируют левостороннюю асимметрию, что указывает на преобладание деревьев меньших *dbh*. Такое распределение характерно для 2-возрастных древостоев, где большая часть деревьев относится к молодому поколению, которое еще не достигло максимального роста старшего элемента леса. Все 6 сценариев PDF показывают на унимодальные распределения, в т. ч. ПП 12, где наблюдается 2-вершинность деревьев, и которую следует отнести к неравномерному, нарушенному типу.

Значения параметров смешивания компонентов (ω_i) показывают вклад отдельного компонента в общее *dbh*-распределение насаждений [14]. Для рассматриваемых в исследовании FMM выявлены как близкие значения для некоторых ПП (4, 15, 19), так и ощутимые различия (ПП 5, 8, 10). При сравнении соотношений ω_i с данными натурных пересчетов компонентов (элементов леса липы) различия оказались существенными, что свидетельствует о невысокой точности деления возрастных групп элементов леса при натурной таксации. Повышение точности интерпретации возрастной структуры требует извлечения большего количества кернов из деревьев на ПП, но эта процедура трудоемка и нецелесообразна, когда необходимо провести инвентаризацию обширных территорий. Кроме того, точность определения возраста деревьев липы ограничена частым возникновением сердцевинной гнили. Поэтому возможность косвенной оценки возрастной структуры путем интерпретации распределения частоты диаметров является перспективным методом.

Оценка качества соответствия FMM представлена в табл. 4. Обнаружено, что смесь скошено-нормальной модели последовательно продемонстрировала наилучшую производительность с точки зрения мер KS и AD, AIC и BIC для всех рассматриваемых ПП. Оценка относительных рангов качества соответствия FMM позволила ранжировать FMM следующим образом: Вейбулла (3,5 – наихудшее соответствие), логнормальное распределение (3,2), гамма (2,9) и скошено-нормальное распределение (1,0). Это согласуется с данными М. Zasada и С. Cieszewski [26], которые отмечают, что гамма FMM превосходит нормальное и логнормальное распределения для характеристики *dbh*-распределения по социальным классам деревьев сосны обыкновенной; F. Ogana [15], показавшего превосходство гамма FMM над Вейбулла; Е. Zenner и М. Teimouri [27], продемонстрировавших лучшую сходимость логарифмически нормального и гамма распределений, чем у распределения Вейбулла. По сравнению с традиционными моделями FMM аппроксимируют сложные и смешанные насаждения регулярной и нерегулярной структуры с высокой точностью, соответствуют *dbh*-распределениям вокруг наибольших локальных максимумов [18, 26, 29].

Таким образом, скошено-нормальная FMM может надежно аппроксимировать PDF диаметров разновозрастных древостоев липы мелколистной и стать ключевым инструментом для перевода данных полевых измерений в динамические модели, прогнозирующие развитие леса.

Таблица 4

Показатели соответствия для применения моделей конечной смеси для ПП
Compliance parameters for the application of FMM for sample plots

ПП	Показатель	Распределение			
		Вейбулла	гамма	логнормальное	скошено-нормальное
1	KS	0,111	0,076	0,078	0,042
	AD	8,864	4,757	4,740	0,902
	AIC	4509,412	4433,810	4425,402	4355,660
	BIC	4531,933	4456,331	4447,923	4378,190
4	KS	0,078	0,105	0,120	0,059
	AD	3,138	3,847	5,093	1,098
	AIC	3858,516	3857,571	3872,067	3813,722
	BIC	3879,992	3879,047	3893,543	3835,199
6	KS	0,093	0,086	0,091	0,046
	AD	4,754	3,627	3,031	0,736
	AIC	2465,235	2434,328	2417,706	2361,350
	BIC	2484,553	2453,646	2437,024	2380,668
8	KS	0,076	0,076	0,084	0,042
	AD	2,589	2,055	2,393	0,458
	AIC	3173,575	3153,083	3157,731	3130,518
	BIC	3194,132	3173,640	3178,288	3151,075
9	KS	0,081	0,075	0,093	0,042
	AD	3,916	5,044	6,787	0,920
	AIC	4689,929	4706,404	4733,698	4628,150
	BIC	4712,062	4728,536	4755,831	4650,283
10	KS	0,086	0,086	0,078	0,053
	AD	3,875	3,356	2,898	1,407
	AIC	4425,982	4419,576	4394,769	4376,450
	BIC	4448,504	4442,097	4417,290	4398,971
12	KS	0,113	0,089	0,100	0,053
	AD	6,908	4,081	4,426	1,346
	AIC	3624,924	3591,890	3592,037	3532,113
	BIC	3645,855	3612,821	3612,968	3553,044
14	KS	0,071	0,102	0,115	0,077
	AD	2,460	3,154	4,296	1,415
	AIC	3898,285	3883,967	3892,434	3867,974
	BIC	3919,834	3905,516	3913,983	3889,523

Заклучение

Представленный в работе метод позволяет анализировать структуру древостоев, основываясь исключительно на измерениях диаметра. В ис-

следованных естественных разновозрастных насаждениях липы мелколистной эмпирические распределения по диаметру характеризуются нерегулярными, сложными и скошенными формами унимодального типа. Данные распределения наилучшим образом аппроксимируются моделями конечных смесей, которые одновременно позволяют оценить долю и частотное распределение 2-возрастных компонентов. Среди рассмотренных в работе 4 моделей конечных смесей использующая скошено-нормальное распределение установлена как наилучшая для моделирования распределений по диаметру на исследованных пробных площадях. Она продемонстрировала эффективность с точки зрения баланса между точностью и сложностью. Моделирование конечных смесей представляет собой полезный инструмент для характеристики разнообразия структуры древостоев, прогнозирования динамики леса и планирования лесохозяйственных мероприятий. Направлением дальнейшего развития апробированного в настоящей работе подхода к исследованию разновозрастных древостоев липы мелколистной может стать установление взаимосвязи между параметрами древостоев и моделей конечных смесей для различных стадий развития насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Габделхаков А.К., Коновалов В.Ф., Рахматуллин З.З., Мартынова М.В., Фазлутдинов И.И. Вариативность диаметров деревьев в древостоях липы мелколистной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 42–57.

Gabdelkhakov A.K., Konovalov V.F., Rakhmatullin Z.Z., Martynova M.V., Fazlutdinov I.I. Variability of Tree Diameters in Small-Leaved Linden Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 42–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1>

2. Габделхаков А.К., Ситдииков М.Р. Ход роста деревьев липы мелколистной в разновозрастном древостое // Вестн. БГАУ. 2013. № 3(27). С. 119–122.

Gabdelkhakov A.K., Sitdikov M.R. *Tilia cordata* Mill. Growth Rate in an Uneven-Aged Stand. *Vestnik BSAU*, 2013, no. 3(27), pp. 119–122. (In Russ.).

3. Ганина Н.В. Распределение деревьев по диаметру с помощью функции Вейбулла // Лесоведение. 1984. № 2. С. 65–70.

Ganina N.V. Diameter Distribution of Trees by the Weibull Distribution. *Lesovedenie* = Forest Science, 1984, no. 2, pp. 65–70. (In Russ.).

4. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Оценка статистических моделей распределения деревьев по диаметру в культурах сосны // Лесохоз. информ. 2022. № 1. С. 50–61. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.03>

Dubenok N.N., Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Estimation of Statistical Models of Distribution of Diameters of Trees in Pine Plantations. *Forestry information*, 2022, no. 1, pp. 50–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.03>

5. Bassil S., Nyland R.D., Kern Ch.C., Kenefic L.S. Dynamics of the Diameter Distribution after Selection Cutting in Uneven- and Even-Aged Northern Hardwood Stands: A Long-Term Evaluation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 1525–1539. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0204>

6. Jaworski A., Kołodziej Z., Bartkiewicz L. Structure and Dynamics of Stands of Primeval Character Composed of the Little-Leaf Linden (*Tilia cordata* Mill.) in the “Las lipowy Obrozyska” Reserve (Southern Poland). *Journal of Forest Science*, 2005, vol. 51, no. 7, pp. 283–304. <https://doi.org/10.17221/4565-JFS>

7. Jaworski A., Podlaski R. Modelling Irregular and Multimodal Tree Diameter Distributions by Finite Mixture Models: An Approach to Stand Structure Characterization. *Journal of Forest Research*, 2012, vol. 17(1), pp. 79–88. <https://doi.org/10.1007/s10310-011-0254-9>

8. Kara F. Comparison of Tree Diameter Distributions in Managed and Unmanaged Kazdaği Fir Forests. *Silva Balcanica*, 2021, vol. 22(1), pp. 31–43.

<https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e58020>

9. Liu C., Beaulieu J., Prigent G., Zhang S.Y. Applications and Comparison of Six Methods for Predicting Parameters of the Weibull Function in Unthinned *Picea glauca* Plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, iss. 1, pp. 67–75.

<https://doi.org/10.1080/02827580802644599>

10. Liu C., Zhang L., Davis C.J., Solomon D.S., Grove J.H. A Finite Mixture Model for Characterizing the Diameter Distribution of Mixed-Species Forest Stands. *Forest Science*, 2002, vol. 48, iss. 4, pp. 653–661. <https://doi.org/10.1093/forestscience/48.4.653>

11. Liu F., Li F., Zhang L., Jin X. Modeling Diameter Distributions of Mixed-Species Forest Stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, vol. 29, iss. 7, pp. 653–663.

<https://doi.org/10.1080/02827581.2014.960891>

12. McLachlan G.J., Lee S.X., Rathnayake S.I. Finite Mixture Models. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 2019, vol. 6, pp. 355–378.

<https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-031017-100325>

13. Nagel T.A., Svoboda M., Diaci J. Regeneration Patterns after Intermediate Wind Disturbance in an Old-Growth *Fagus–Abies* Forest in Southeastern Slovenia. *Forest Ecology and Management*, 2006, vol. 226, iss. 1-3, pp. 268–278.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.039>

14. Ogana F.N. Application of Finite Mixture to Characterise Degraded *Gmelina arborea* Roxb Plantation in Omo Forest Reserve, Nigeria. *Journal of Forest and Environmental Science*, 2018, vol. 34, iss. 6, pp. 451–456. <https://doi.org/10.7747/JFES.2018.34.6.451>

15. Ogana F.N. Evaluation of Finite Mixture Models for Describing the Structure of Disturbed *Gmelina* Stands in Oluwa Forest Reserve, Nigeria. *Floresta*, 2021, vol. 51, iss. 3, pp. 794–802. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i3.73163>

16. Podlaski R. Two-Component Mixture Models for Diameter Distributions in Mixed-Species, Two-Age Cohort Stands. *Forest Science*, 2010, vol. 56, iss. 4, pp. 379–390. <https://doi.org/10.1093/forestscience/56.4.379>

17. Podlaski R. Highly Skewed and Heavy-Tailed Tree Diameter Distributions: Approximation Using the Gamma Shape Mixture Model. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, iss. 11, pp. 1275–1283. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0175>

18. Podlaski R., Roesch F.A. Modelling Diameter Distributions of Two-Cohort Forest Stands with Various Proportions of Dominant Species: A Two-Component Mixture Model Approach. *Mathematical Biosciences*, 2014, vol. 249, iss. 1, pp. 60–74.

<https://doi.org/10.1016/j.mbs.2014.01.007>

19. Poudel K.P., Cao Q.V. Evaluation of Methods to Predict Weibull Parameters for Characterizing Diameter Distributions. *Forest Science*, 2013, vol. 59, iss. 2, pp. 243–252.

<https://doi.org/10.5849/forsci.12-001>

20. Seidel W., Mosler K., Alker M. A Cautionary Note on Likelihood Ratio Tests in Mixture Models. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 2000, vol. 52, iss. 3, pp. 481–487. <https://doi.org/10.1023/A:1004117419204>

21. Teimouri M. EM Algorithm for Mixture of Skew-Normal Distributions Fitted to Grouped Data. *Journal of Applied Statistics*, 2021, vol. 48, iss. 7, pp. 1154–1179.

<https://doi.org/10.1080/02664763.2020.1759032>

22. Teimouri M., Doser J., Finley A. ForestFit: An R Package for Modeling Plant Size Distributions. *Environmental Modelling & Software*, 2020, vol. 131, iss. 2, art. 104668.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104668>

23. Teimouri M., Podlaski R. Modeling Tree Diameters Using Mixtures of Skewed Student's *t* and Related Distributions. *Canadian Journal of Forest Research*, 2020, vol. 50, iss. 10, pp. 1039–1049. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0008>

24. Teimouri M., Rezakhah S., Mohammdpour A. EM Algorithm for Symmetric Stable Mixture Model. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 2018, vol. 47, iss. 2, pp. 582–604. <https://doi.org/10.1080/03610918.2017.1288244>

25. Zasada M. Evaluation of the Double Normal Distribution for Tree Diameter Distribution Modeling. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 2, art. 956. <https://doi.org/10.14214/sf.956>

26. Zasada M., Cieszewski C.J. A Finite Mixture Distribution Approach for Characterizing Tree Diameter Distributions by Natural Social Class in Pure Even-Aged Scots Pine Stands in Poland. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 204, iss. 2-3, pp. 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.023>

27. Zenner E.K., Teimouri M. Modeling in Forestry Using Mixture Models Fitted to Grouped and Ungrouped Data. *Forests*, 2021, vol. 12(9), art. 1196. <https://doi.org/10.3390/f12091196>

28. Zhang L., Gove J.H., Liu C., Leak W.B. A Finite Mixture of Two Weibull Distributions for Modeling the Diameter Distributions of Rotated-Sigmoid, Uneven-Aged Stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 31, no. 9, pp. 1654–1659. <https://doi.org/10.1139/x01-086>

29. Zhang L., Liu Ch. Fitting Irregular Diameter Distributions of Forest Stands by Weibull, Modified Weibull, and Mixture Weibull Models. *Journal of Forest Research*, 2006, vol. 11, iss. 5, pp. 369–372. <https://doi.org/10.1007/s10310-006-0218-7>

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

Научная статья

УДК 630*231:631.412

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-35-49

**Влияние почвенных свойств на подрост *Picea abies* (L.)
Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) при лесовозобновлении на сплошной
вырубке в средней подзоне тайги Архангельской области**

А.С. Ильинцев^{1,2✉}, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [N-6286-2019](https://orcid.org/0000-0003-3524-4665),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Е.Н. Наквасина², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

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

А.Г. Волков², канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [D-7384-2017](https://orcid.org/0000-0002-3082-6263),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3082-6263>

А.П. Богданов^{1,2}, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [A-8611-2019](https://orcid.org/0000-0002-1655-7212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Архангельск, Россия; a.ilintsev@narfu.ru✉, aleksandr_bogd@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; a.ilintsev@narfu.ru✉, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.25 / Одобрена после рецензирования 16.06.25 / Принята к печати 19.06.25

Аннотация. Повреждение почвы лесозаготовительной техникой на вырубках – одно из негативных экологических последствий, которые сказываются на последующем лесовозобновлении. Целью проведенного исследования было выявление наиболее значимых для ели обыкновенной почвенных факторов при ее восстановлении на поврежденных при лесозаготовках участках. Исследование проводили на 7-летней сплошной вырубке из-под черничного типа леса в Вилегодском лесничестве Архангельской области. Замерили основные биометрические показатели у 40 экземпляров подроста ели на пасеке; у 20 – на волоке с мелкими повреждениями (глубина менее 15 см); у 20 – на волоке со значительными повреждениями (глубина 15–30 см). В корнеобитаемом слое почвы вблизи каждого растения взяли образцы почв, у которых в лабораторных условиях определили водно-физические и агрохимические показатели. Для анализа данных использовали методы многомерной статистики. Установлено, что наиболее отзывчивыми на различия условий произрастания являются высота, связанная с приростом, а также длина боковых корней. Выявлено, что по водно-физическим и агрофизическим свойствам почвы к ели на пасеке ближе ель на почве с мелкими повреждениями. Различия по свойствам почвы на участках волоков с мелкими и глубокими повреждениями связаны с уплотнением после проезда лесозаготовительной техники. Эти условия определили лучшее развитие подроста на пасеке по сравнению с поврежденными участками. Выявлено, что приоритет в обеспечении ростовых параметров ели в первые годы жизни обеспечивает большую плотность твердой фазы почвы, а также тесно связанные с этим показателем плотность сложения, общую пористость и пористость аэрации. Одним из факторов, ограничивающих рост ели в местах повреждения почвенного покрова, является глубина повреждения. Из агрохимических свойств почвы значимы содержание органического углерода и общего азота. Таким образом, чрезмерное колесобразование,

ухудшая почвенные свойства, может препятствовать успешному лесовозобновлению. Необходимо ограничивать образование глубоких колеи при лесозаготовках.

Ключевые слова: ель обыкновенная, *Picea abies*, вырубка, подзолистая почва, повреждения лесной почвы, волокни, водно-физические свойства почвы, агрохимические свойства почвы, подрост, биометрические показатели подроста, влияние почвы на рост, лесовозобновление

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

Благодарности: Агрохимические свойства почвы определены в аккредитованной испытательной лаборатории на базе ФГБУ САС «Архангельская».

Для цитирования: Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н., Волков А.Г., Богданов А.П. Влияние почвенных свойств на подрост *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) при лесовозобновлении на сплошной вырубке в средней подзоне тайги Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 35–49. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-35-49>

Original article

The Effect of Soil Properties on the Seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in Reforestation at Clear-Cutting in the Middle Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region

Aleksey S. Ilintsev^{1,2✉}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: N-6286-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4665>

Elena N. Nakvasina², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: A-5165-2013,

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

Alexey G. Volkov², Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: D-7384-2017,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3082-6263>

Alexander P. Bogdanov^{1,2}, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist, Assoc.

Prof.; ResearcherID: A-8611-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

¹Northern Research Institute of Forestry, Arkhangelsk, Russia; a.ilintsev@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; a.ilintsev@narfu.ru, nakvasina@yandex.ru, a.g.volkov@narfu.ru, aleksandr_bogd@mail.ru

Received on April 8, 2025 / Approved after reviewing on June 16, 2025 / Accepted on June 19, 2025

Abstract. Soil disturbances caused by harvesting and logging machinery and equipment at cutting areas are one of the negative environmental impacts that affect subsequent natural reforestation. The research aimed at identifying the most important soil factors for Norway spruce recovery in areas disturbed by harvesting and logging. The study was carried out at the 7-year-old clear-cutting area in a blueberry forest in the Vilegodsky Forestry District of the Arkhangelsk Region. Basic biometric parameters were recorded for 40 spruce young trees at the cutting strip; for 20 trees on a skid trail with shallow disturbances (depth less than 15 cm); and for 20 trees on a skid trail with deep disturbances (depth 15–30 cm). Soil samples were collected from the root zone near each plant, and their water-physical and agrophysical properties were tested in the laboratory. Multivariate statistical methods were used to analyze the data. It has been found that the traits most responsive to variations in growing conditions are

height, as defined by increment, and the length of lateral roots. The study showed that, in terms of the soil's water-physical and agrophysical properties, the spruce trees at the cutting strip are more similar to those growing on soil with shallow disturbances. Differences in soil properties between areas with shallow and deep disturbances are related to soil compaction caused by the passage of harvesting and logging machinery and equipment. These conditions led to better growth of young trees at the cutting strip compared to the disturbed areas. High density of the soil solid phase, as well as bulk density, total porosity, and aeration porosity – which are closely related to this parameter – have been found to be key factors in ensuring spruce growth parameters throughout the first few years of life. The depth of disturbance is one of the factors limiting spruce growth in areas where the soil cover has been disturbed. The organic carbon and total nitrogen content are significant parameters of the soil's agrochemical properties. Thus, excessive rutting degrades soil properties and can hinder successful reforestation. It is necessary to limit the formation of deep ruts during harvesting and logging operations.

Keywords: Norway spruce, *Picea abies*, clear-cutting, podzolic soil, forest soil disturbances, skid trails, water-physical soil properties, agrochemical soil properties, young growth, young growth biometric parameters, soil effect on growth, reforestation

Funding: This research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-01014, <https://rscf.ru/project/23-76-01014/>.

Acknowledgments: The agrochemical soil properties determined at the Certified Testing Laboratory affiliated with the Federal State Budgetary Institution “Arkhangelsk Agrochemical Service Station”.

For citation: Ilintsev A.S., Nakvasina E.N., Volkov A.G., Bogdanov A.P. The Effect of Soil Properties on the Seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in Reforestation at Clear-Cutting in the Middle Taiga Subzone of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 35–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-35-49>

Введение

Лесозаготовительные работы, проводимые с использованием современной техники (харвестеры + форвардеры), наносят серьезные экологические повреждения почвенному и растительному покровам, однако их применение в мире растет в геометрической прогрессии [17]. Особенно чувствительны к ним подзолистые почвы, распространенные на севере России [14].

Одним из основных повреждений почвенного покрова считается уплотнение, сопровождающееся перемешиванием и сдвиганием почвы, что приводит к ее морфологическим, водно-физическим и химическим изменениям [6, 9, 17, 20, 32]. При сдвиге физических параметров возможно нарушение водных потоков, в т. ч. застой влаги в колеях, что зачастую приводит к локальной смене процесса почвообразования [11, 14]. Повреждения почвы носят долговременный характер, и, хотя несколько сглаживаются за первые 2–3 года [7, 21], сохраняются до 30 лет и более [11, 34].

В то же время экологические последствия зависят не только от механизмов, применяемых на лесозаготовках, но и от многих природных факторов: свойства и строение почвы, уклон местности, наличие или отсутствие порубочных остатков на волоках и др.

Большое значение имеет также интенсивность воздействия транспортного средства, т. е. число проходов техники [9, 18, 19, 28]. Глубина повреждения почвы (колеи разной глубины) влияет на почвенные параметры и может опре-

делять успешность возобновления. Тем более что при малом числе проходов техники (3) сохраняется исходная подзолистая почва, тогда как при большем числе проходов (10) на дне колеи формируется турбированный горизонт [9].

Повреждения почвы лесозаготовительной техникой на волоках сказываются на лесовозобновлении. На уплотненной почве хуже прорастают семена, замедляется развитие самосева и подроста [9, 17, 18, 26, 31, 32]. С точки зрения восстановления экосистем важно с помощью междисциплинарных подходов [21] установить показатели, ограничивающие возобновление древесных пород на поврежденных участках. Прежде всего, речь идет о почвенных характеристиках, их сравнении с природными, формирующимися на неповрежденных почвах, в т. ч. на пасаках, где морфологически почвы близки к фоновым [9]. Подобные аспекты взаимодействия почвы и семян находятся в центре внимания при подборе способов обработки почвы в целях лесовосстановления [5]. По теме влияния почвы на растения вырубков, особенно молодого возраста, подобных работ мало, и в основном они касаются потоков веществ в системе почва–фитоценоз [2, 3].

Цель исследования – выявить закономерности влияния комплекса водно-физических и агрохимических свойств почвы на рост и развитие ели обыкновенной при ее восстановлении в местах с разной степенью повреждения почвенного покрова при лесозаготовках; отобрать наиболее значимые почвенные факторы для обеспечения роста ели на 7-летний вырубке из-под черничного типа леса в Двинско-Вычегодском таежном районе для экологического управления процессом естественного лесовосстановления.

Объекты и методы исследования

Исследование провели в 2024 г. на 7-летней вырубке с мерами содействия естественному лесовозобновлению в черничном типе условий произрастания в Вилегодском лесничестве Архангельской области (Двинско-Вычегодский таежный район). Лесосека была разработана в 2017 г. с использованием комплекса лесозаготовительной техники из харвестера John Deere 1270 и форвардера John Deere 1210 по сортиментной технологии: ширина технологических коридоров составляла 4–5 м, ширина пазов – 16–18 м. Площадь вырубки – 4,3 га.

Древостой до сплошной рубки имел следующие характеристики: состав – 7Е1С2Б, класс возраста – 10, полнота – 0,6, средняя высота – 16 м, диаметр – 22 см, запас древесины – 160 м³/га, тип леса – ельник черничный, класс бонитета – V. Рельеф равнинный. Почва – подзолистая иллювиально-железистая супесчаная на среднем суглинке, типичная для района исследования. В 2019 г. количество жизнеспособного подроста ели после рубки составило 1,4 тыс. шт./га. Преобладал мелкий и средний подрост.

На пасаках и волоках у подроста ели последующей генерации близкого возраста (5–7 лет) измерили основные биометрические показатели: надземную часть, в т. ч. высоту – от поверхности почвы до верхушечной почки, прирост по высоте за последние 3 года, диаметр стволика на уровне поверхности почвы; подземную часть – длину бокового и главного корней. Обследовали 40 экземпляров подроста ели на пасеке; 20 – на волоке с мелкими (глубина менее 15 см) повреждениями почвы; 20 – на волоке со значительными повреждениями (15–30 см).

В корнеобитаемом слое каждого экземпляра подроста ели отобрали образцы почвы для оценки ее свойств. Сбор и обработку образцов проводили в соответствии с устоявшимися в лесном почвоведении методами [13]. Использовали металлический цилиндр с режущими краями (бура), вместимостью 52,78 см³ (диаметр – 4,1 см, длина – 4 см). Образцы взвесили на аналитических весах с точностью до 0,01 г. В лабораторных условиях определили основные водно-физические свойства почвы: полевую влажность, плотность сложения, плотность твердой фазы, общую пористость, пористость аэрации [12, 30]. pH_{KCl} установлена по ГОСТ 26483–85, массовая доля органического вещества (С) – ГОСТ 26213–2021 п. 6.1, массовая доля подвижных форм калия (K_2O) и фосфора (P_2O_5) – ГОСТ Р 54650–2011, общий азот (N) – ГОСТ Р 58596–2019 п. 7.1.

Для анализа полученных показателей использовали методы многомерной статистики. В связи с тем, что исходные данные не подчинялись закону нормального распределения, был выбран метод, устойчивый к отклонениям. Различия в биометрических показателях подроста ели на разных микросайтах, а также влияние на них почвенных свойств устанавливали с помощью метода прямой (ограниченной) ординации RDA [23]. Он представляет собой прямое расширение множественной регрессии для моделирования данных с многомерным откликом (биометрические показатели подроста). Результатом является сжатое пространство признаков с осями, обусловленными (взвешенными) независимыми (почвенными) переменными. Такие оси объясняют зависимость матрицы откликов от матрицы предикторов [16]. Перед анализом данные стандартизировались.

Статистическую значимость различий между микросайтами по биометрическим показателям подроста ели определяли с помощью дисперсионного анализа, основанного на матрице сходства подроста [15, 27]. В качестве меры различий использовали расстояние Евклида. Значение p получали с помощью перестановочного теста [25].

Все расчеты проводили с использованием статистического языка R [33]. Применяли пакеты: *vegan* [29], *ggplot2* [35].

Результаты исследования и их обсуждение

Подрост ели на пасеке по биометрическим показателям заметно превосходит подрост на поврежденных участках (рис. 1). Для него характерна средняя высота 56 см, с линейным среднегодовым приростом 10 см, а также хорошее развитие корневой системы – как главного корня, так и боковых разветвлений. Ель на поврежденных участках отстает по сравнению с подростом на пасеке по росту как надземных, так и подземных органов. Подрост на уплотненной почве образует короткие основные корни, немногочисленные и недлинные мелкие всасывающие корни [22, 26, 32], что снижает поглощение воды растениями и приводит к ограничению фотосинтетических процессов.

Рост ели на почве с мелкими и глубокими повреждениями достаточно близок. Это может быть связано со строением почвы на дне колеи (повреждения) и строением того слоя, в котором распространяются корни подроста. При глубоких повреждениях (более 15 см) в образующийся турбированный слой примешиваются порубочные остатки и органика лесной подстилки [9, 14], при разложении они могут обеспечивать почву азотом.

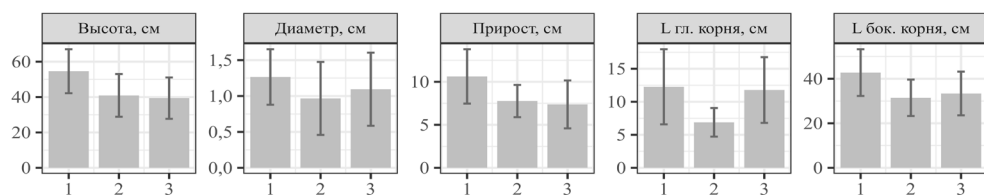


Рис. 1. Биометрические показатели подроста ели обыкновенной на микросайтах: 1 – пасека; 2 – мелкие повреждения; 3 – глубокие повреждения.

Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Л. гл. корня, Л. бок. корня – длина главного и бокового корней соответственно

Fig. 1. Biometric parameters of spruce young trees at microsites: 1 – cutting strip; 2 – shallow disturbances; 3 – deep disturbances. Mean $\pm$ standard deviation. Л. гл. корня, Л. бок. корня – lengths of the main and lateral roots, respectively

По комплексу биометрических показателей (рис. 2) подрост ели на разных микросайтах достоверно отличается ($R^2 = 0,18$ при $p = 0,009$).

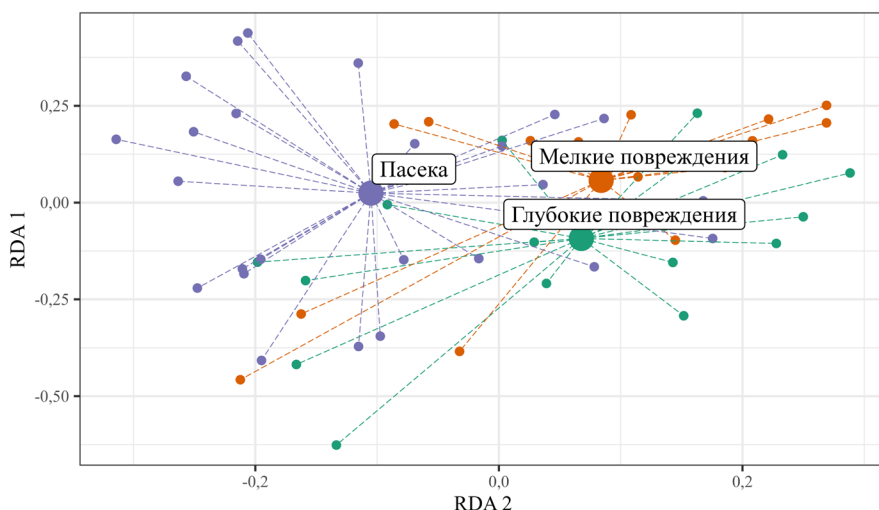


Рис. 2. Результаты прямой ординации подроста ели на разных участках произрастания в пространстве первых 2 осей (RDA 1 и RDA 2)

Fig. 2. Results of the direct ordination of spruce young trees at different growing sites on the first two axes (RDA 1 and RDA 2)

При этом на поврежденных участках присутствует подрост, растущий так же, как и на пасеке, что делает общую картину менее выраженной. Установлены различия по комплексу показателей роста между подростом пасеки и участков как с мелкими ($R^2 = 0,24$; $p = 0,002$), так и с глубокими повреждениями ($R^2 = 0,27$; $p = 0,002$). Однако различные биометрические показатели подроста вносят разный вклад в формирование отличий между подростом на разных участках. Наибольший вклад в различия между подростом на пасеке и участках с мелкими повреждениями принадлежит длине боковых корней, которая обеспечивает около 33 % различий (рис. 3).

У подроста на пасеке длина боковых корней на 43 % больше, чем у подроста на участках с мелкими повреждениями. Достоверные различия между подростом на этих участках установлены и по высоте. В опытах с ольхой и кленом [34] отрицательное влияние уплотнения почвы также больше сказалось на росте корней, чем надземной части.



Рис. 3. Различия подроста на микросайтах в пространстве первых 2 осей прямой ординации (RDA 1 и RDA 2): а – пасаеки и места глубоких повреждений ($R^2 = 0,24$; $p = 0,002$); б – пасаеки и места мелких повреждений ($R^2 = 0,27$; $p = 0,002$); в – места мелких и глубоких повреждений ($R^2 = 0,02$; $p = 0,18$). Стрелками указаны векторы, вносящие существенный вклад в различия участков ($p < 0,05$): 1–5 – высота, диаметр, прирост, длина главного и бокового корней соответственно, см

Fig. 3. Differences in young trees at microsites on the first two axis of direct ordination (RDA 1 and RDA 2): а – cutting strips and sites with deep disturbances ($R^2 = 0.24$; $p = 0.002$); б – cutting strips and sites with shallow disturbances ($R^2 = 0.27$; $p = 0.002$); в – sites with shallow and deep disturbances ($R^2 = 0.02$; $p = 0.18$). The arrows show the vectors that contribute significantly to the site differences ($p < 0.05$): 1–5 – height, diameter, growth, and length of the main and lateral roots, respectively, cm

Между подростом на пасаеке и участках с глубокими повреждениями почвы наибольший вклад в различия вносит линейный прирост (высота) – около 39 %. У подроста ели на пасаеке средний прирост по высоте на 48 % больше, чем у подроста на участках с глубокими повреждениями почвы. Достоверные различия также установлены по другим биометрическим показателям в этой паре групп, однако их вклад в комплекс показателей значительно ниже.

Различия в характеристиках подроста на разных участках с повреждением почвенного покрова в целом незначимы ($R^2 = 0,02$; $p = 0,18$), однако наблюдаются некоторые различия по длине главного корня ($p = 0,061$) и диаметру ($p = 0,045$), что может быть связано со свойствами почвы в корнеобитаемом слое. На более заметное снижение длины ствола, длины главного корня и общей сухой биомассы клена и ольхи при произрастании на почве с мелкими повреждениями (2 прохода) по сравнению с более интенсивными (6 и 10) указывали зарубежные исследователи [28].

Водно-физические и агрохимические свойства почвы на вырубках зависят от исходной почвы и определяются степенью ее перемешанности и строением турбированных горизонтов при проезде лесозаготовительной техники. Оказывает влияние и глубина повреждения, которая является индикатором уровня воздействия в экологических исследованиях. По мнению [14], при мелких повреждениях почвы (соответствуют глубине повреждения при 3 проходах техники) наблюдается в основном сдавливание, а при глубоких (10 проходов) – сдавливание, турбирование и перемешивание минеральной части почвы с лесной подстилкой и порубочными остатками. Примешивание органической составляющей в почвенную массу изменит и физические, и химические свойства почвы.

Для статистических расчетов была использована глубина колеи в месте расположения подроста относительно уровня пасаки, отражающая различия в строении почвы после повреждения различной силы. Так, в нашем случае для мелких повреждений она составляла в среднем 9,0 см (с колебаниями от 4 до 15 см), а для глубоких – 22,1 см (от 16 до 29 см).

Рассматриваемые водно-физические (влажность, плотность сложения и твердой фазы, общая пористость и пористость аэрации) и агрохимические (содержание элементов питания и pH среды) свойства почвы являются наиболее наглядными для оценки воздействия лесозаготовительной техники на лесные почвы [17] и определяют рост растений [5].

В корнеобитаемом слое почвы у подроста на неповрежденных и поврежденных участках наблюдаются различия по водно-физическим и агрохимическим свойствам (рис. 4). Так, плотность сложения колеблется от 1,33 до 1,46 г/см³, плотность твердой фазы – от 2,09 до 2,44 г/см³, влажность – от 21,6 до 25,9 %, общая пористость – от 29,5 до 43,4 %, пористость аэрации – от 2,2 до 11,9 %. В целом для нативной почвы пасаки характерна меньшая изменчивость признаков. Различия по водно-физическим свойствам на участках волоков с мелкими и глубокими повреждениями связаны с уплотнением после проезда лесозаготовительной техники. Кроме того, вклад вносит строение корнеобитаемого слоя в местах повреждений. Для участков, подвергшихся воздействию лесозаготовительной техники, важно установить различия с почвой пасаки.

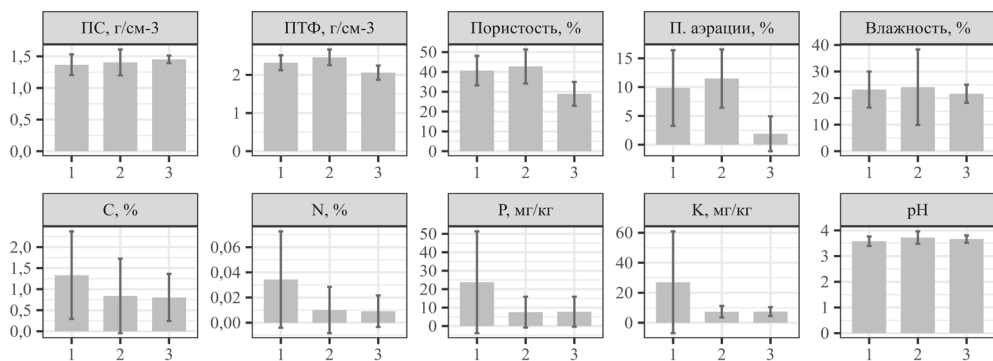


Рис. 4. Водно-физические и агрохимические свойства почвы в корнеобитаемом слое подроста ели на разных микросайтах: 1 – пасака, 2 – мелкие повреждения, 3 – глубокие повреждения. Среднее значение $\pm$ стандартное отклонение.

ПС – плотность сложения; ПТФ – плотность твердой фазы; П. аэрации – пористость аэрации; С – органический углерод, %; N – общий азот, %; Р – подвижный фосфор, мг/кг; К – подвижный калий, мг/кг; pH – pH_{KCl} солевой вытяжки

Fig. 4. Water-physical and agrochemical properties of the soil in the root zone of spruce young trees at different microsites: 1 – cutting strip, 2 – shallow disturbances, 3 – deep disturbances. Mean $\pm$ standard deviation. ПС – bulk density; ПТФ – solid soil phase density, g/cm³; П. аэрации – aeration porosity; С – organic carbon, %; N – total nitrogen, %; Р – labile phosphorus, mg/kg; К – labile potassium, mg/kg; pH – pH_{KCl} of salt extract

При сравнении водно-физических свойств почвы на пасаке и в местах мелких повреждений установлены существенные различия плотности сложения ($p = 0,05$) на границе доверительного интервала и влажности ($p = 0,07$) на уровне тенденции. Подобное увеличение плотности сложения подзолистой почвы отмечали при 3 проходах грузеной техники [18].

Наибольшее число водно-физических показателей почвы, значимо отличающихся от показателей почвы на пасеке, установлено для участков с глубокими повреждениями. Так, обнаружены существенные различия плотности твердой фазы ($p = 0,04$), пористости ($p = 0,001$) и пористости аэрации ($p = 0,002$). При этом достоверной разницы в плотности сложения не установлено, что, скорее всего, связано с уплотнением почвы после проезда лесозаготовительной техники. Уплотнение и привнесение органической массы при перемешивании почвы может нивелировать существенные изменения физических свойств [14]. По мнению [8], при большом числе проходов техники (более 5) плотность сложения почвы уменьшалась, но оставалась выше, чем на пасеке. Другие исследователи [18] отмечали, что при большом числе проходов техники плотность верхнего турбированного слоя изменялась незначительно, а различия наблюдались в нижележащем нетрансформированном горизонте.

При сравнении водно-физических свойств почвы на участках мелких и глубоких повреждений установлены достоверные различия плотности твердой фазы ($p = 0,001$), пористости ($p = 0,001$) и пористости аэрации ($p = 0,001$). На участках с мелкими повреждениями почвы эти показатели заметно выше, что может быть связано не только с интенсивностью движения техники, но и с примешиванием детрита и лесной подстилки при проезде техники.

Кислые и бедные питательными веществами подзолистые почвы в пасеке по своим агрохимическим свойствам являются типичными для региона, но их повреждение во время лесозаготовительных работ может усиливать физико-химические и биологические процессы [6]. По мнению [20], на поврежденных при лесозаготовке участках волоков происходит увеличение микробной (МВС/SOC) и ферментативной активностей, что приводит к ускорению оборота углерода и увеличению потери CO_2 .

В целом агрохимические показатели в корнеобитаемом слое у подроста достаточно низкие и колеблются незначительно: доля органического вещества – от 0,80 до 1,44 %, доля азота – от 0,008 до 0,061 %, подвижных форм фосфора – от 7,8 до 22,5 мг/кг, подвижных форм калия – от 7,5 до 26,7 мг/кг. Наиболее высокие показатели характерны для пасеки по сравнению с поврежденными почвами. При этом как ненарушенная, так и поврежденная почва остается кислой, $\text{pH}_{\text{KCl}} = 3,5\text{--}3,7$.

В нашем случае достоверно различается для пасек и участков с повреждениями содержание подвижного калия ($p = 0,044$ и $p = 0,055$ соответственно), фосфора ($p = 0,066$ и $p = 0,056$) и азота ($p = 0,041$ и $p = 0,118$). Различия по органическому углероду в обоих случаях недостоверны.

Отсутствуют достоверные различия химических показателей почвы для участков с мелкими и глубокими повреждениями.

Сравнение характеристик между вариантами выявляет действие отдельного фактора, однако почвенные свойства связаны между собой, могут влиять прямо и косвенно. Это не всегда реально учесть при парных статистических расчетах. Поэтому при наличии большого числа разнонаправленных показателей использовали анализ с многомерным откликом, который позволяет определить комбинации предикторов, объясняющих максимальную изменчивость характеристик.

Визуализация направленности и силы влияния почвенных факторов на биометрические показатели подроста ели на пасеке и участках с повреждени-

ями приведена на рис. 5. В роли предикторов выступают основные почвенные свойства: водно-физические (влажность, плотность твердой фазы почвы, общая пористость), агрохимические (органическое вещество почвы, общий азот и фосфор) и глубина повреждений. Из построения моделей исключены плотность сложения почвы и пористость аэрации по причине их высокой корреляции с рассматриваемыми свойствами почвы (VIF равен 75 и 36 соответственно).

Хорошо заметна разнонаправленность векторов водно-физических и агрохимических свойств почвы и одного фактора, непосредственно связанного с повреждениями почвы (глубина колеи), который синхронизируется с плотностью твердой фазы, тесно связанной с плотностью сложения. Эти 2 фактора могут быть определяющими в группе рассматриваемых показателей.

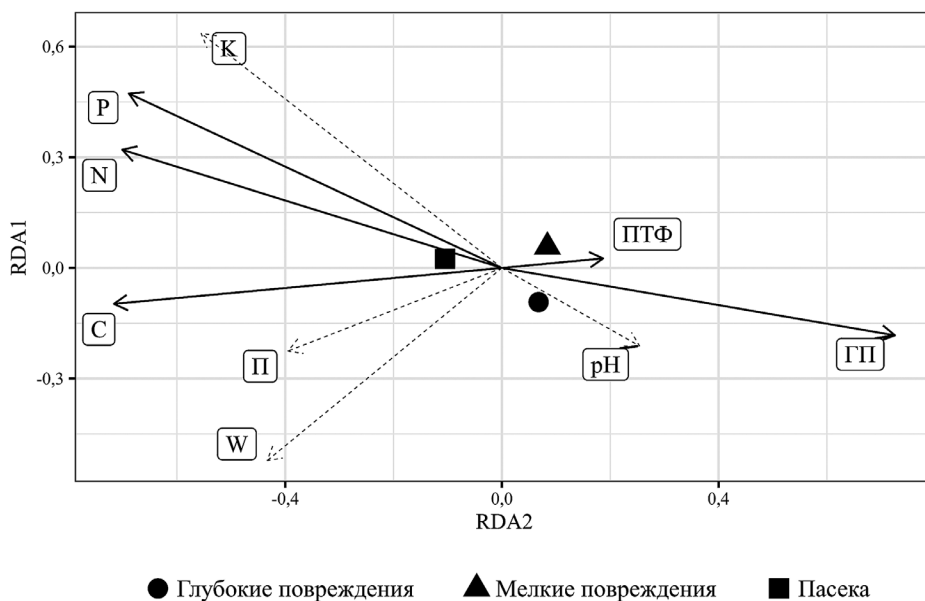


Рис. 5. Влияние почвенных свойств на подрост ели обыкновенной на разных участках в пространстве первых 2 осей прямой ординации (RDA 1 и RDA 2). Стрелками указаны векторы: П – пористость, %; W – влажность, %; ГП – глубина повреждений, см; ПТФ, C, N, P, K, pH – см. рис. 4

Fig. 5. Effect of soil properties on spruce young trees at different sites in the first two axes of direct ordination (RDA 1 and RDA 2). The arrows show the vectors: П – porosity, %; W – moisture, %; ГП – depth of disturbances, cm; ПТФ, C, N, P, K, pH – see fig. 4

Если оценить векторность почвенных показателей пасеки и поврежденных участков, то лучшие свойства видны для пасеки. Расположение пасеки в пространстве осей RDA отражает оптимум почвенных свойств для 7-летнего подроста ели в черничном типе леса. Условия, обеспечивающие рост вида на участках мелких повреждений, доказанно ближе к почвенным условиям пасеки. С увеличением глубины повреждения почвы, по крайней мере в пределах 15–30 см, сходство почвенных условий с пасекой снижается. Это связано с увеличением не только глубины повреждения почвы, но и плотности твердой фазы, сложения, а также со снижением количества органического вещества в почве, общего азота и подвижных форм фосфора.

В комплексе почвенных факторов (водно-физические и агрохимические), которые связаны между собой и действуют синхронно, важно выделить наиболее значимые, определяющие развитие подроста на вырубке [5, 7]. Для отбора репрезентативных показателей из числа изученных построили 6 моделей с разным числом предикторов.

Анализ избыточности (RDA) показал, что почвенные свойства обуславливают до 40 % дисперсии биометрических показателей подроста ели, из них 34 % приходится на первую ось (RDA 1). Неучтенные факторы, которые, вероятно, относятся к абиотическим, объясняют 60 % вариабельности биометрических показателей подроста, с долей первой оси РС 1 32 %.

Селекция модели RDA с помощью информационного критерия (AIC) и коэффициентов детерминации (R^2) позволила выявить почвенные факторы, наиболее влияющие на биометрические показатели роста ели обыкновенной на рубках в условиях черничного типа леса (см. таблицу).

Статистические характеристики моделей RDA
Statistics of RDA models

Модель	Число переменных	Коэффициент детерминации		Псевдо-критерий AIC	Псевдо-F-статистика	
		обычный	приведенный		F	Pr (>F)
1: Y ~ ПТФ + П + ГП + W + C + N + P + K + pH	9	0,39	0,28	87,79	3,75	0,0001
2: ГП	1	0,18	0,16	90,68	12,91	0,0001
3: ГП + C	2	0,27	0,24	85,36	10,85	0,0001
4: ГП + C + ПТФ	3	0,31	0,27	83,54	8,78	0,0001
5: ГП + C + ПТФ + N	4	0,35	0,30	82,44	7,54	0,0001
6: ГП + C + ПТФ + N + P*	5	0,37	0,32	81,70	6,69	0,0001

Примечание: Условные обозначения – см. рис. 4, 5. *Фосфор влияет на уровне тенденции, $p = 0,061$.

Использованные для построения моделей предикторы (модель 5) описывают 37 % изменчивости 7-летнего подроста ели, что лишь на 2 % меньше, чем модель 1. При этом скорректированный R^2 больше, чем у модели 1. Исходя из этого, 4 показателя почвы можно признать основными для обеспечения роста ели на лесосеках: глубину повреждения почвы, плотность твердой фазы, содержание органического углерода и общего азота. К значимым априори можно добавить и 2 тесно связанных с плотностью твердой фазы и пористостью показателя – плотность сложения и пористость аэрации.

То есть наиболее значимыми факторами для роста 7-летнего подроста ели на рубке из-под черничного типа леса оказались физические. Ранее [5] также выделили близкую группу водно-физических свойств почв (плотность сложения, пористость, пористость аэрации, влажность), определяющих рост растений. Именно эти свойства обеспечивают насыщение почвы водой и кислородом, поддерживают биогеохимические циклы, доступность питательных веществ и фотосинтезирующую деятельность растительности. Исследованиями [20] увеличение объемной плотности мелкозернистой почвы было определено как «золотая черта», которая определяет влияние трелевочных волоков на многие параметры почвы. Другие авторы [34] считают наиболее влияющим на рост растений сопротивление проникновения/твердость почвы, показатель близкий по своей сути с плотностью сложения.

В число репрезентативных факторов входят также содержание органического вещества и азота. Именно органическое вещество, примененное при турбации почв после прохода лесозаготовительной техникой, при разложении обеспечивает почву азотом и элементами питания, стимулирующим рост растений [4, 24]. Важную роль органического вещества почвы для роста растений отмечали [5, 7, 10]. Это характерно и для азота, поступающего в почву из разлагающегося органического вещества [1].

Однако ограничивающей рост ели в местах повреждения почвенного покрова на волоках можно признать глубину повреждений почвы, т. е. образующиеся колеи, в которых идет поселение подроста последующей генерации. По мнению [18], именно число проездов форвардера, отражающееся глубиной повреждения почвенного покрова, определяет изменение почв.

Заключение

Многомерный анализ (RDA) позволил на примере изучения роста и почвенных свойств корнеобитаемого слоя 7-летнего подроста ели обыкновенной, произрастающего на вырубке в черничном типе условий в Архангельской области (подзона средней тайги), выявить различия в его биометрических параметрах и дать оценку влияния физико-химических свойств почвы с учетом произрастания ели в местах мелких (до 15 см) и глубоких (15–30 см) повреждений на волоках в сравнении с пасекой.

При поселении подроста ели на участках с мелкими повреждениями биометрические показатели надземной и подземной частей растений оказались значимо ниже, чем у подроста на пасеке. При глубоких повреждениях почвы различия с подростом пасеки сказались преимущественно на высоте растений.

В то же время именно для корнеобитаемого слоя подроста в местах с глубокими повреждениями почвы установлены существенные различия плотности твердой фазы, общей пористости и аэрации по сравнению с пасекой. Для корнеобитаемого слоя подроста в местах мелких повреждений статистически значимые различия с пасекой установлены в плотности сложения и (на уровне тенденции) во влажности. Разная степень изменения почвенных свойств может быть обусловлена одновременным уплотнением почвы техникой и привнесом органического материала при перемешивании порубочных остатков и растительной массы с минеральной частью почвы.

Из агрохимических свойств достоверно различаются для пасеки и участков с повреждениями, а также между участками с мелкими и значительными повреждениями содержание подвижного калия, фосфора и общего азота. Количество органического углерода одинаково для всех исследованных вариантов.

Почвенные свойства суммарно обуславливают до 40 % дисперсии биометрических показателей подроста ели. Расположение участков в пространстве осей RDA с оценкой по комплексу почвенных свойств выявило, что условия, обеспечивающие рост ели при произрастании на местах с мелкими повреждениями доказанно ближе к почвенным условиям в корнеобитаемом слое подроста на ненарушенной почве пасеки. При большей глубине повреждения почвы на волоках, по крайней мере в пределах 15–30 см, сходство почвенных условий с пасекой заметно снижается. Фактор глубины повреждения почвы является ведущим в комплексе изученных свойств. При обеспечении

роста 7-летней ели на вырубке большое значение имеют физические свойства почвы в корнеобитаемом слое подроста. К ним относятся плотность твердой фазы почвы, а также тесно связанные с этим показателем плотность сложения и общая пористость, пористость аэрации. Из агрохимических свойств почвы важны содержание органического углерода и общего азота, что связано с при-мешиванием детрита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобкова К.С., Галенко Э.П., Загирова С.В., Сенькина С.Н., Тужилкина В.В., Машика А.В., Патов А.И., Никонов В.В., Лукина Н.В., Исаева Л.Г. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 337 с.

Bobkova K.S., Galenko E.P., Zagirova S.V., Senkina S.N., Tuzhilkina V.V., Mashika A.V., Patov A.I., Nikonov V.V., Lukina N.V., Isayeva L.G. *Virgin Spruce Forest of North: Biodiversity, Structure, Functions*. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2006. 337 p. (In Russ.).

2. Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Потоки азота и зольных элементов в системе «почва–фитоценоз» на вырубках среднетаежных ельников Республики Коми // Лесоведение. 2019. № 6. С. 512–523.

Bobkova K.S., Likhanova N.V. Fluxes of Nitrogen and Mineral Elements between Soils and Phytocenosis on the Clearcuts in Spruce Forests of Middle Taiga, the Komi Republic. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 512–523. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819060020>

3. Бобкова К.С., Лиханова Н.В., Кузнецов М.А. Влияние промышленных рубок на круговорот веществ в системе почва–фитоценоз среднетаежных ельников на подзолистых почвах. СПб.: Наука, 2024. 246 с.

Bobkova K.S., Likhanova N.V., Kuznetsov M.A. *Effect of Industrial Logging on the Cycle of Substances in the Soil–Phytocenosis System of Middle-Taiga Spruce Forests on Peat-Podzolic Soils*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2024. 246 p. (In Russ.).

4. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.

Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. *Dynamics of Carbon Organic Matter Content in Middle Taiga Spruce Forests Growing on Automorphic Soils*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2014. 270 p. (In Russ.).

5. Варфоломеев Л.А., Сунгуров Р.В. Почвенная экология лесных культур на Севере. Архангельск: СевНИИЛХ, 2007. 292 с.

Varfolomeev L.A., Sungurov R.V. *Soil Ecology of Forest Plantations in the North*. Arkhangelsk, NRIF Publ., 2007. 292 p. (In Russ.).

6. Дымов А.А., Лаптева Е.М. Изменение подзолистых почв на двучленных отложениях при рубках // Лесоведение. 2006. № 3. С. 42–49.

Dymov A.A., Lapteva E.M. Changes in Podzolic Soils on Bilayered Deposits under the Influence of Felling. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2006, no. 3, pp. 42–49. (In Russ.).

7. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.

Karpachevskiy L.O. *Forest and Forest Soils*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).

8. Катаров В.К., Сюнев В.С., Ратькова Е.И., Герасимов Ю.Ю. Влияние форвардеров на лесные почвогрунты // Resources and Technology. 2012. Т. 9, № 2. С. 73–81.

Katarov V.K., Syuney V.S., Ratkova E.I., Gerasimov Y.Y. Impact of Wood Forwarding on Forest Soils. *Resources and Technology*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 73–81. (In Russ.).

9. Кутявин И.Н., Манов А.В., Старцев В.В., Дымов А.А. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 123–132.

Kutyavin I.N., Manov A.V., Starcev V.V., Dymov A.A. The Logging Equipment Effect on the Dynamics of Natural Reforestation of After Cutting Mixed Coniferous-Deciduous Stand in the Middle Taiga. *Theoretical and Applied Ecology*, 2024, no. 3, pp. 123–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-123-132>

10. Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Теория и практика выращивания сосны и ели в культурах. Архангельск: АГТУ, 2002. 220 с.

Merzlenko M.D., Babich N.A. *Theory and Practice of Growing Pine and Spruce in Plantations*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 220 p. (In Russ.).

11. Наквасина Е.Н., Ильинцев А.С., Дунаева А.-А.П. Восстановительные сукцессии повреждений почвенного покрова при проведении рубок ухода в ельнике черничном северной тайги // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 11–19.

Nakvasina E.N., Ilintsev A.S., Dunaeva A.-A.P. Productive Soil Succession after Thinning in Northern Taiga Bilberry Spruce Forest. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 11–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-11-19>

12. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.
Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Soil Science*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 146 p. (In Russ.).

13. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: Архангельск. гос. техн. ун-т, 2007. 127 с.

Nakvasina E.N., Seryy V.S., Semenov B.A. *Field Workshop on Soil Science*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 127 p. (In Russ.).

14. Огородняя С.А., Бутылкина М.А., Красиков С.Р., Дымов А.А. Физические свойства минеральных горизонтов почв вырубки (средняя тайга, Республика Коми) // Вестн. Московск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2024. Т. 79, № 2. С. 15–25.

Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical Properties of Upper Mineral Horizons of Cutting Area (Middle Taiga, Komi Republic). *Lomonosov Soil Science Journal*, 2024, vol. 79, no. 2, pp. 15–25. (In Russ.).
<https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25>

15. Anderson M.J. A New Method for Non-Parametric Multivariate Analysis of Variance. *Austral Ecology*, 2001, vol. 26, iss. 1, pp. 32–46.
<https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>

16. Borcard D., Gillet F., Legendre P. *Numerical Ecology with R*. New York, Springer, 2018. 435 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71404-2>

17. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

18. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in Soil and Vegetation with Different Number of Passes of Wheeled Forestry Equipment (Middle Taiga, Komi Republic). *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, pp. 1633–1646. <https://doi.org/10.1134/S1064229322110023>

19. Ilintsev A., Nakvasina E., Högbom L., Bogdanov A. Influence of Ruts on the Physical Properties of Gleyic Retisols after Logging Machinery Passage. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2022, vol. 37, iss. 4, pp. 254–263.
<https://dx.doi.org/10.1080/02827581.2022.2085785>

20. Klein-Raufhake T., Hölzel N., Schaper J.J., Hortmann A., Elmer M., Fornfeist M., et al. Severity of Topsoil Compaction Controls the Impact of Skid Trails on Soil Ecological Processes. *Journal of Applied Ecology*, 2024, vol. 61, iss. 8, pp. 1817–1828.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.14708>

21. Labelle E.R., Hansson L., Högbom L., Jourgholami M., Laschi A. Strategies to Mitigate the Effects of Soil Physical Disturbances Caused by Forest Machinery: A Comprehensive Review. *Current Forestry Reports*, 2022, vol. 8, pp. 20–37. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00155-6>
22. Latterini F., Dyderski M.K., Horodecki P., Rawlik M., Stefanoni W., Högbom L., et al. A Meta-Analysis of the Effects of Ground-Based Extraction Technologies on Fine Roots in Forest Soils. *Land Degradation & Development*, 2023, vol. 35, iss. 1, pp. 9–21. <https://doi.org/10.1002/ldr.4902>
23. Legendre P., Legendre L. *Numerical Ecology*. Amsterdam, Elsevier, 2012. 990 p.
24. Liang M., Sugimoto A., Tei S., Bragin I.V., Takano S., Morozumi T., et al. Importance of Soil Moisture and N Availability to Larch Growth and Distribution in the Arctic Taiga-Tundra Boundary Ecosystem, Northeastern Siberia. *Polar Science*, 2014, vol. 8, iss. 4, pp. 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.07.008>
25. Manly B.F.J. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*. London, Chapman & Hall, 2006. 455 p.
26. Mariotti B., Hoshika Y., Cambi M., Marra E., Feng Z., Paoletti E., Marchi E. Vehicle-Induced Compaction of Forest Soil Affects Plant Morphological and Physiological Attributes: A Meta-Analysis. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 462, art. 118004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118004>
27. McArdle B.H., Anderson M.J. Fitting Multivariate Models to Community Data: A Comment on Distance-Based Redundancy Analysis. *Ecology*, 2001, vol. 82, iss. 1, pp. 290–297. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0290:FMMTCD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0290:FMMTCD]2.0.CO;2)
28. Naghdi R., Tavankar F., Solgi A., Nikooy M., Marchi E., Picchio R. Effects on Soil Physicochemical Properties and Seedling Growth in Mixed High Forests Caused by Cable Skidder Traffic. *iForest*, 2023, vol. 16, iss. 2, pp. 127–135. <https://doi.org/10.3832/for4103-016>
29. Oksanen J., Simpson G., Blanchet F., Kindt R., Legendre P., Minchin P., et al. *Vegan: Community Ecology Package*. R Package Version 2.6-10, 2025. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed 01.02.25).
30. Osman K.T. *Forest Soils: Properties and Management*. Switzerland, Springer, 2013. 217 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02541-4>
31. Picchio R., Mederski P.S., Tavankar F. How and How Much, Do Harvesting Activities Affect Forest Soil, Regeneration and Stands? *Current Forestry Reports*, 2020, vol. 6, pp. 115–128. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00113-8>
32. Picchio R., Tavankar F., Nikooy M., Pignatti G., Venanzi R., Lo Monaco A. Morphology, Growth and Architecture Response of Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Maple Tree (*Acer velutinum* Boiss.) Seedlings to Soil Compaction Stress Caused by Mechanized Logging Operations. *Forests*, 2019, vol. 10(9), art. 771. <https://doi.org/10.3390/f10090771>
33. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Austria, Vienna: The R Foundation for Statistical Computing, 2025. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 01.02.25).
34. Tavankar F., Venanzi R., Nikooy M., Lo Monaco A., Picchio R., Naghdi R. The Influence of Logging-Related Soil Disturbance on Pioneer Tree Regeneration in Mixed Temperate Forests. *Plants*, 2024, vol. 13(15), art. 2149. <https://doi.org/10.3390/plants13152149>
35. Wickham H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York, Springer, 2016. 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

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

Научная статья

УДК 581,1:630*181:630*161

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-50-62

Зависимость скорости фотосинтеза и транспирации *Pinus sylvestris* L. и *Picea abies* L. от факторов среды

А.Г. Молчанов, д-р биол. наук; ResearcherID: [J-1392-2016](https://orcid.org/0009-0001-0252-3599),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0252-3599>

Институт лесоведения РАН, с. Успенское, Московская обл., Россия;

a.georgievich@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.25 / Одобрена после рецензирования 19.07.25 / Принята к печати 20.07.25

Аннотация. В естественных условиях при оптимальной влажности почвы в начале вегетационного периода сравнивали фотосинтез и транспирацию сосны и ели. Исследование проводилось в Серебряноборском лесничестве Института лесоведения РАН Московской области. Актуальность работы обусловлена значительностью количества усохших ельников и желательностью проведения на этих участках посадок сосны. Сравнительные исследования фотосинтеза и транспирации сосны и ели, произрастающих в одинаковых условиях, немногочисленны. Для определения фотосинтеза и транспирации использовали негерметичные открытые камеры. Интенсивность фотосинтеза и транспирации охвоенных побегов определяли по разности концентраций соответственно CO_2 и H_2O между наружным и выходящим из камеры воздухом, интенсивности протягивания воздушного потока и горизонтальной площади проекции поверхности хвои в экспозиционной камере. Концентрации CO_2 и H_2O измеряли с помощью портативного инфракрасного газоанализатора LI-840 (Li-Cor, США). Обеднение воздуха CO_2 в камере в среднем было на 2 % ниже, чем в окружающем воздухе. Побудителями расхода воздуха служили мембранные микрокомпрессоры (Sonic-388, Китай). Полученные данные показали, что интенсивность фотосинтеза за малооблачный день была выше у сосны более чем на 88 %, чем у ели. В облачный день различия оказались ниже – 20 %. В малооблачный и пасмурный дни различия в интенсивности транспирации у обеих пород были меньше – 18,5 и 20 % соответственно. Характер зависимости CO_2 -газообмена у сосны и ели от солнечной радиации и температуры воздуха схож, различия наблюдаются только по интенсивности, хотя в условиях недостаточного водообеспечения сосна показывает более высокий фотосинтез. У сосны в оптимальных лесорастительных условиях интенсивность CO_2 -газообмена выше, чем у ели, почти в 2 раза. Полученные расчетные данные по фотосинтезу и транспирации были близки экспериментальным. Транспирация по характеру зависимости у сосны и ели различается значительно сильнее. У сосны различие обусловлено в основном солнечной радиацией, у ели – температурой воздуха.

Ключевые слова: сосна, *Pinus sylvestris* L., ель, *Picea abies* L., фотосинтез, транспирация, солнечная радиация, зависимость фотосинтеза от солнечной радиации, зависимость транспирации от солнечной радиации, температура воздуха, влажность воздуха

Для цитирования: Молчанов А.Г. Зависимость скорости фотосинтеза и транспирации *Pinus sylvestris* L. и *Picea abies* L. от факторов среды // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 50–62. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-50-62>



Original article

The Effect of Environmental Factors on Photosynthesis and Transpiration Rates in *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* L.

Alexander G. Molchanov, Doctor of Biology; ResearcherID: [J-1392-2016](https://orcid.org/0009-0001-0252-3599),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0252-3599>

Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, s. Uspenskoe, Moscow Region, Russia; a.georgievich@gmail.com

Received on April 29, 2025 / Approved after reviewing on July 19, 2025 / Accepted on July 20, 2025

Abstract. We compared photosynthesis and transpiration in pine and spruce trees growing in natural conditions with optimal soil moisture at the beginning of the growing season. The research was carried out at the Serebryanoborsk Forest District of the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences in the Moscow Region. The research relevance stems from the significant amount of dead spruce stands and the need for pine reforestation in these areas. There are few comparative studies of photosynthesis and transpiration in pine and spruce trees growing under similar conditions. Leaky open chambers were used to measure photosynthesis and transpiration. The rates of photosynthesis and transpiration in the needle shoots were measured based on the difference in the CO₂ and H₂O concentrations, respectively, between the air outside the chamber and the air exiting the chamber, the airflow velocity, and the horizontal surface area of the needles in the exposure chamber. The CO₂ and H₂O concentrations were measured using a LI-840 portable infrared gas analyzer (Li-Cor, USA). The air depletion by CO₂ in the chamber was, on average, 2 % lower than in the ambient air. The air flow was driven by diaphragm microcompressors (Sonic-388, China). The data showed that, on a mostly sunny day, the rate of photosynthesis in pine trees was more than 88 % higher than in spruce trees. On a cloudy day, the differences were significantly lower (20 %). On a mostly sunny and overcast days, the differences in transpiration rates between the two species were smaller; 18.5 and 20 %, respectively. The relationship between CO₂ exchange in pine and spruce and solar radiation and air temperature is similar; differences are observed only in terms of intensity, although in conditions of water stress, pine shows higher photosynthesis rates. The CO₂ gas exchange intensity in pine trees under optimal forest growing conditions is nearly twice as high as that in spruce trees. The calculated data on photosynthesis and transpiration were close to the experimental values. The nature of the relationship between transpiration and other factors differs significantly more between pine and spruce. In pine, the differences are mainly due to solar radiation, whereas in spruce, they occur due to air temperature.

Keywords: pine, *Pinus sylvestris* L., spruce, *Picea abies* L., photosynthesis, transpiration, solar radiation, effect of solar radiation on photosynthesis, effect of solar radiation on transpiration, air temperature, air humidity

For citation: Molchanov A.G. The Effect of Environmental Factors on Photosynthesis and Transpiration Rates in *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* L. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 50–62. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-50-62>

Введение

Бореальные леса считаются основным местом глобального связывания углерода. Скорость, с которой бореальные хвойные леса обмениваются энергией и парниковыми газами с атмосферой, существенно отличается из-за различий климата зон, в которых обитают леса, и физиологии и морфологии видов в составе.

В течение последних лет изучалось сокращение площади произрастания видов ели, в т. ч. ели европейской (*Picea abies* L.) [20]. В европейской части России также происходит усыхание ели [1, 8]. Обычно усыхание наблюдается в приспевающих и спелых ельниках с долей ели в составе древостоя 6 и более единиц, с полнотой 8 в условиях влажных суборей [5]. Важнейшим фактором называются периодические весенне-летние засухи, создающие стрессовую ситуацию, особенно для высоковозрастных насаждений [7]. Воздействие засушливых или излишне увлажненных периодов является катализатором ослабления деревьев ели. Более устойчивыми к усыханию являются разновозрастные насаждения по сравнению с одновозрастными [9].

Еще одна причина усыхания ельников – заселение деревьев типографом. Он появляется вследствие эндогенных процессов в еловых лесах, вызванных их ослаблением. Они не угрожают существованию ельников, т. к. погибшие от типографа древостои по прошествии некоторого времени восстанавливаются. Это принципиально отличается от последствий усыхания еловых лесов, вызванного экзогенными причинами: ельники, погибшие от огня, вымокания, негативных антропогенных воздействий зачастую не восстанавливаются, даже спустя длительный промежуток времени [4].

Для устранения экологических последствий усыхания ельников предлагается на аллювиальных и водно-ледниковых отложениях создавать культуры сосны, а при наличии маломощных покровных суглинков – культуры сосны и липы [1]. Желательно планирование лесных культур смешанного породного состава. В дополнение к ели в соответствующих условиях могут быть использованы липа, дуб, а также сосна, лиственница. Однако сравнительных исследований фотосинтеза и транспирации появляющихся в этом случае смешанных древостоев, состоящих в основном из ели и сосны, почти нет.

По данным G.E. Jackson et al. [22], сосна обыкновенная, произрастающая в Великобритании, лучше всего развивается на хорошо дренированных почвах в районах с умеренным количеством осадков. Для Тверской области А.В. Варлагиным [3] получено, что при равных внешних гидрометеорологических условиях интенсивность транспирации хвои будет наименьшей у ели и наибольшей у сосны. Очевидно, такое соотношение обусловлено общностью характера транспирации, т. к. согласуется с соотношением устьичной проводимости. Интенсивность транспирации ели в засушливый год была 1,26, во влажный – 1,61, а сосны – 2,72 ммоль/м²·с⁻¹. Ведущим фактором в определении транспирации является дефицит упругости водяного пара. [3]. По данным С.Н. Сенькина [19], в Коми сосна имела транспирацию в мае 150 мг H₂O, а июле 250 мг.

При наблюдении за состоянием и ростом сосны и ели важно знать, при каких условиях окружающей среды зависимость фотосинтеза и транспирации от солнечной радиации, температуры и влажности воздуха для этих пород будет

изменяться, т. е. начнется снижение накопления ассимилятов, а следовательно, и продуктивности древостоев. Также следует поставить вопрос о различиях физиологических показателей у указанных видов в случае их произрастания в оптимальных лесорастительных условиях и о том, какие условия считать оптимальными.

Целью исследования стало определение влияния окружающей среды на газообмен и транспирацию светолубивой (*Pinus sylvestris* L.) и теневыносливой (*Picea abies* L.) хвойных пород.

Задача – посредством эколого-физиологического мониторинга определить оптимальные показатели интенсивности фотосинтеза и транспирации этих пород деревьев [14].

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в Серебряноборском опытном лесничестве Института лесоведения РАН (Московская область) на участке площадью 1 км² между Московской кольцевой дорогой и Рублевским шоссе. Сравнение характеристик территории с данными научных работ, выполненных в Угличском районе Ярославской области [10, 12], показало схожесть состояния древостоев, следовательно, наше исследование проводится на незагрязненном участке.

Работы осуществляли в мае 2017 г. в 140-летнем сосняке разнотравно-черничном I класса бонитета и в произрастающей рядом 60-летней куртине ели. Почва дерново-слабоподзолистая супесчаная, уровень почвенно-грунтовых вод – 2,0–2,5 м. Для сбора данных были созданы вышка высотой 25 м около 140-летнего дерева сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) I класса роста, высотой 27 м и диаметром 45 см; и высотой 20 м – около 60-летней ели обыкновенной (*Picea abies* L.) I класса роста, высотой 22 м и диаметром 30 см.

Для определения фотосинтеза и транспирации использовали негерметичные открытые камеры. Такая схема позволяет оценить интенсивность газообмена в продолжительный промежуток времени, тогда как герметичные камеры дают точечные показатели [11, 21, 25]. В ходе эксперимента с помощью экспозиционных камер, в которых находился охвоенный побег, поддерживалась постоянная скорость окружающего наружного воздуха – 1,0–1,5 л/мин. Для установления скорости воздуха применяли поплавковый расходомер РС-3А. Интенсивность фотосинтеза и транспирации охвоенных побегов рассчитывали по разности концентраций CO₂ и H₂O соответственно между наружным воздухом и выходящим из камеры, интенсивности протягивания воздушного потока и горизонтальной площади проекции поверхности хвои в экспозиционной камере [13, 14, 17].

Обеднение воздуха CO₂ в камере в среднем было на 2 % ниже, чем в окружающем воздухе [27]. Побудителями расхода воздуха служили мембранные микрокомпрессоры (Sonic-388, Китай). Концентрацию CO₂ и H₂O измеряли с помощью портативного инфракрасного газоанализатора LI-840 (Li-Cor, США).

Полученные данные регистрировались запоминающим устройством-логгером (EMS, Чехия). Устройство позволяет работать непрерывно в течение нескольких суток по алгоритму «опыт–контроль» с задаваемым интервалом от 15 до 35 мин на каждую камеру, на одну камеру уходило около 6 мин: 3 мин на

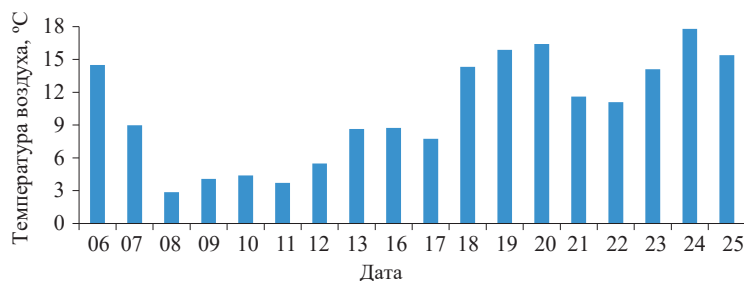
опыт и 3 мин на контроль. Показания, полученные в первую минуту, не использовали при расчетах, т. к. в это время из камеры поступал воздух, смешанный с окружающим, или из предыдущей камеры.

Газообмен определяли порометром с инфракрасным газоанализатором [24].

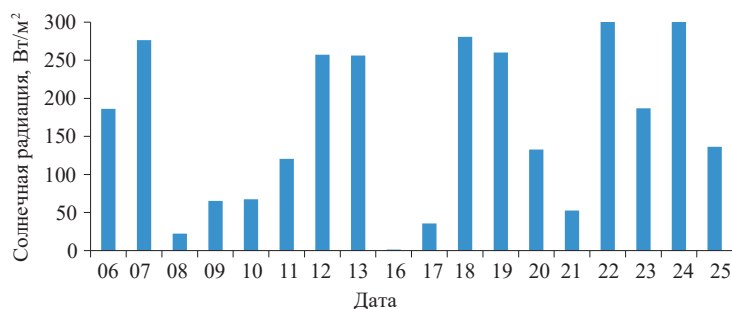
Для измерения предрассветного водного потенциала использовали камеру давления [18]. Факторы среды (температура, влажность) регистрировались логгером. Измерения были сделаны непосредственно около объектов исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

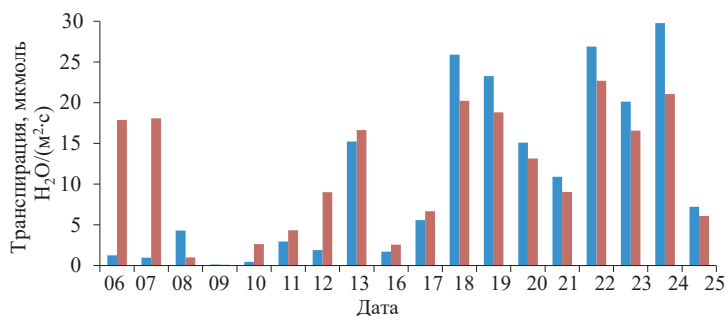
В весенний период сильным ограничивающим фактором для газообмена CO_2 и транспирации H_2O являются низкие температуры воздуха и почвы. Наряду с прямым воздействием они оказывают тормозящее влияние на скорость восстановления хвои после зимних повреждений [23, 26]. В начале мая различия в газообмене и транспирации, несмотря на высокие солнечную радиацию и температуру воздуха, наиболее значительные (рис. 1).



а



б



в

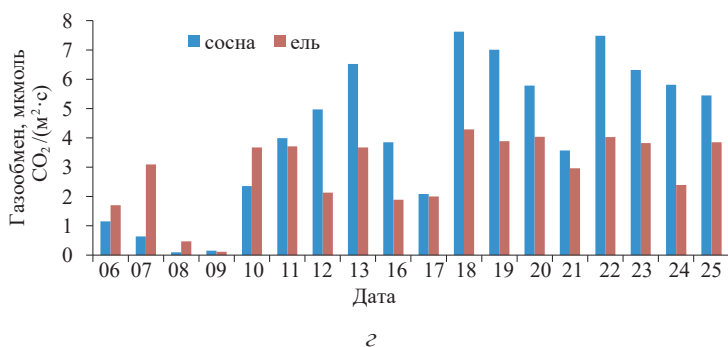


Рис. 1. Среднедневные показатели окружающей среды и физиологических процессов в мае 2017 г. для побегов из верхней световой части крон ели и сосны:

а – температура воздуха; б – солнечная радиация; в – транспирация; г – газообмен

Fig. 1. Average daily environmental and physiological parameters in May 2017 for shoots from the upper light parts of spruce and pine crowns: а – air temperature; б – solar radiation; в – transpiration; г – gas exchange

В начале мая транспирация у ели была в 15 раз интенсивнее, чем у сосны, интенсивность обмена CO_2 – выше в 3 раза. Но уже к середине мая, после 2 безоблачных дней и при повышении среднедневной температуры воздуха до 8–10 °С интенсивность обмена CO_2 и H_2O у двух пород стала одинаковой, а затем у сосны – выше, данная тенденция сохранилась в течение всего вегетационного периода. Так, в конце мая фотосинтез был максимальным у ели – 4 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{с})$, а у сосны составил 7,5 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{с})$, транспирация ели была 27 мг $\text{H}_2\text{O}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$, а сосны – 23 мг $\text{H}_2\text{O}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Несмотря на высокий возраст сосны интенсивность фотосинтеза в исследуемых условиях оставалась такой же. По нашим данным, в оптимальных условиях саженцы сосны 6-летнего возраста имели такую же интенсивность фотосинтеза – 7–8 мкмоль $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ [15, 16]. В южной Карелии для деревьев сосны 35-летнего возраста проводилось исследование фотосинтеза. Интенсивность фотосинтеза при световом насыщении почти не отличалась от данных нашего исследования [2]. В условиях Европейского Севера [6] у здоровых деревьев интенсивность транспирации, определенная методом быстрого взвешивания, для ели была 173 мг $\text{H}_2\text{O}/(\text{г}\cdot\text{ч})$, для сосны – 129 мг $\text{H}_2\text{O}/(\text{г}\cdot\text{ч})$. *Picea abies* 10-летнего возраста в Германии в оптимальных условиях имела интенсивность фотосинтеза 23 ммоль $\text{CO}_2/\text{ч}$, а интенсивность транспирации 16 мг $\text{H}_2\text{O}/\text{мин}$, или до 4 ммоль $\text{H}_2\text{O}/\text{ч}$. Таким образом, соотношение интенсивности фотосинтеза у сосны и ели в исследуемых условиях, несмотря на различие в возрасте, не имеет существенного значения.

Результаты исследования интенсивности фотосинтеза и транспирации сосны и ели при оптимальной влажности почвы свидетельствуют об их хорошо выраженной суточной изменчивости в зависимости от солнечной радиации. В малооблачный день в полуденный период у обеих пород наблюдаются максимальные интенсивности как фотосинтеза, так и транспирации. При этом оба показателя стабильно следуют изменениям солнечной радиации (рис. 2).

В день со сплошной облачностью наблюдаются хаотичные изменения в поглощении солнечной радиации, фотосинтезе и транспирации. В малооблачный день и в день со сплошной облачностью транспирация у обеих пород про-

должается и после захода солнца. В малооблачный день у сосны интенсивность транспирации была выше, чем у ели, более чем на 88 %, а в облачный день различия достигли только 20 %.

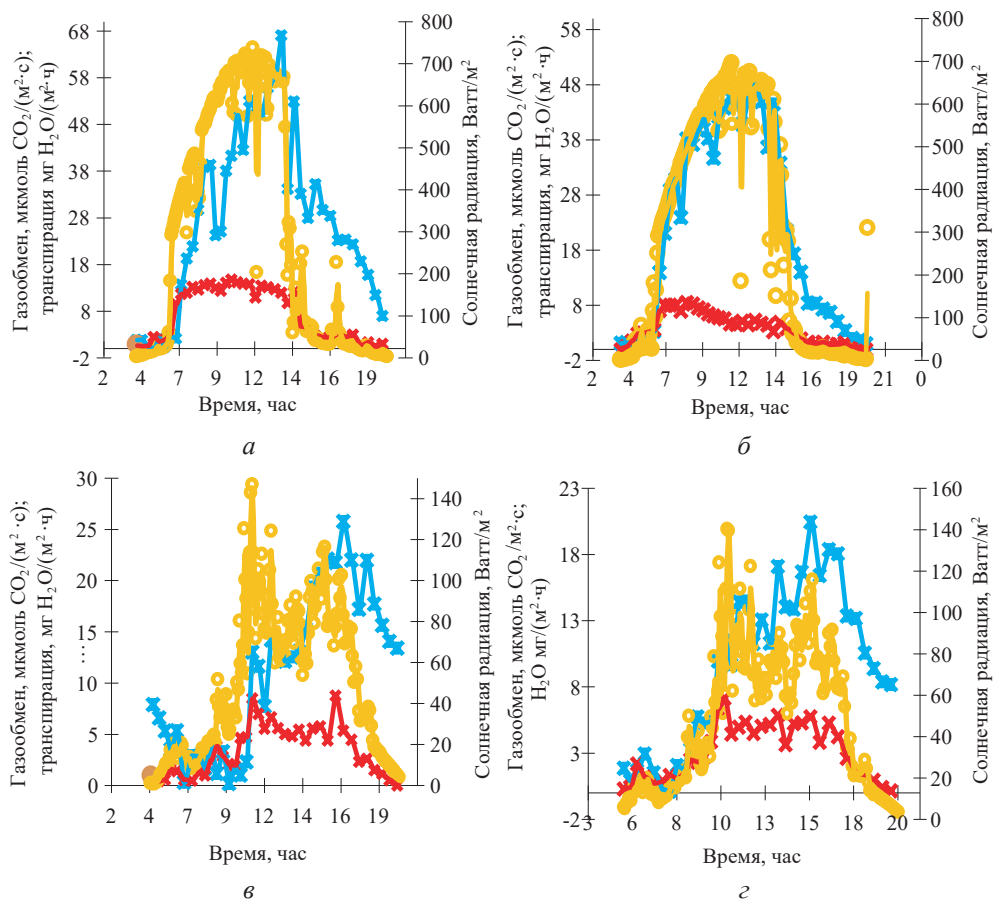


Рис. 2. Суточный ход солнечной радиации (желтый цвет), интенсивности транспирации (голубой) и фотосинтеза (красный) у сосны (а, в) и ели (б, г): а, б – в малооблачный день; в, г – в облачный день

Fig. 2. Daily variations in solar radiation (yellow), transpiration rate (blue), and photosynthesis (red) in pine (а, в) and spruce (б, г) on: а, б – a mostly sunny day; в, г – a cloudy day

Различия в интенсивности транспирации у обеих пород были меньше – в малооблачный день на 18,5 %, и в пасмурный на 20 %. По данным G.E. Jackson et al. [22], суточный ход газообмена у *Pinus sylvestris* и *Picea sitchensis* в оптимальных условиях водообеспечения (–0,3 МПа) схожий и достигает максимума в 12 часов дня. Во второй половине мая у обеих пород предрасветный водный потенциал был –0,3 МПа. Но уже в конце месяца отмечен незначительный недостаток влаги, интенсивность фотосинтеза ели снижается в большей степени, чем у сосны. Так, в малооблачный день при предрасветном потенциале хвои равном –0,8 МПа дневной ход фотосинтеза ели уменьшается уже с 9 часов, а у сосны – только после 14 часов.

Зависимости фотосинтеза и транспирации сосны и ели от влажности воздуха одинаковы: с увеличением влажности воздуха интенсивность этих пока-

зателей снижается (рис. 3). Для транспирации ели зависимость от влажности воздуха больше ($R^2 = 0,81$), чем для сосны ($R^2 = 0,73$). Зависимость фотосинтеза от влажности воздуха недостоверна как у сосны, так и у ели.

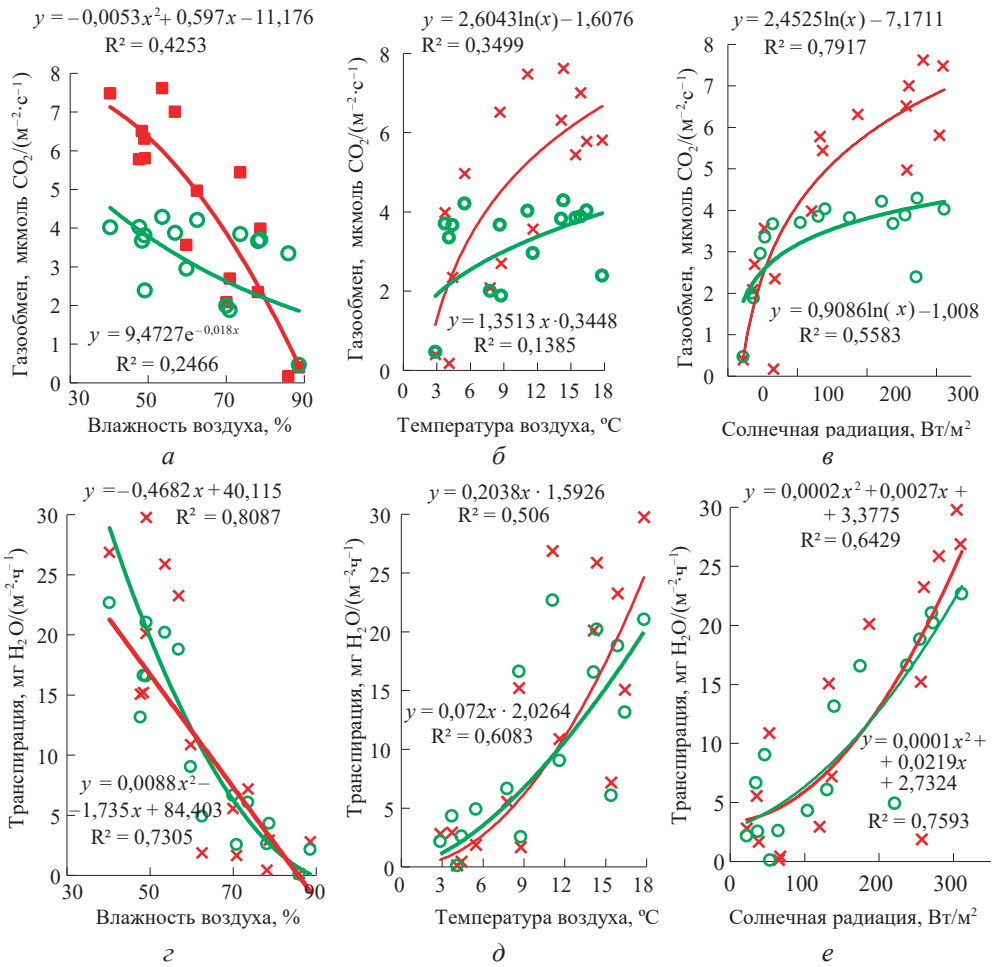


Рис. 3. Зависимость средневенной интенсивности фотосинтеза (а, б, в) и транспирации (г, д, е) сосны (красные линии) и ели (зеленые): а, г – от влажности воздуха; б, д – от температуры воздуха; в, е – от солнечной радиации

Fig. 3. Dependence of the average daily photosynthetic rate (а, б, в) and transpiration rate (г, д, е) of pine (red lines) and spruce (green lines) on: а, г – air humidity; б, д – air temperature; в, е – solar radiation

Зависимость фотосинтеза от температуры воздуха как у сосны, так и у ели растет с увеличением температуры воздуха, однако имеет недостоверный характер. Зависимость интенсивности транспирации от температуры воздуха выражена больше: для ели $R^2 = 0,61$; для сосны $R^2 = 0,51$, изменения и величины у обеих пород схожи.

Зависимость фотосинтеза от солнечной радиации и у сосны, и у ели имеет логарифмический характер: для сосны $R^2 = 0,79$, для ели $R^2 = 0,56$. Зависимость транспирации от солнечной радиации прослеживается лучше, особенно для ели, у которой $R^2 = 0,76$, для сосны $R^2 = 0,64$. При этом для транспирации характер изменения кривых зависимости у обеих пород практически одинаков.

Взаимосвязь транспирации и фотосинтеза при оптимальной влажности почвы в мае у сосны значительная – $R^2 = 0,75$, тогда как у ели очень слабая – $R^2 = 0,15$ (рис. 4), коэффициент корреляции соответственно составил 0,85 и 0,29 [14].

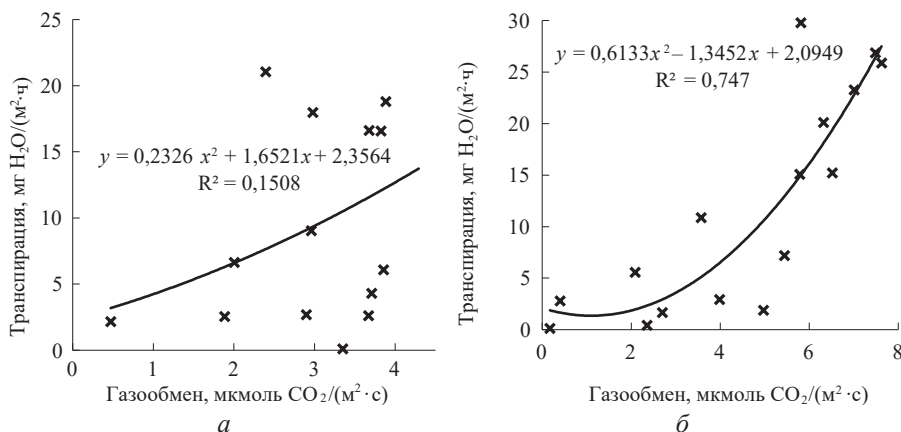


Рис. 4. Взаимосвязь среднедневной интенсивности транспирации и среднедневной интенсивности фотосинтеза: а – у ели; б – у сосны

Fig. 4. Correlation between average daily transpiration rate and average daily photosynthesis rate in: а – spruce; б – pine

В результате получили, что в естественных условиях зависимость фотосинтеза сосны и ели от влажности, температуры воздуха и солнечной радиации не всегда прослеживается явно. Основным внешним фактором, влияющим на интенсивность фотосинтеза сосны, по данным [2], является солнечная радиация. Рассмотрим, как влияют на фотосинтез одновременно все исследуемые параметры окружающей среды.

Используя экспериментальные данные за май рассчитали уравнения зависимости фотосинтеза сосны от солнечной радиации, температуры воздуха и его влажности. Применена множественная нелинейная регрессия, при этом вид уравнения и состав независимых переменных подбирались на основе визуального анализа зависимостей от отдельных переменных и по более высокому коэффициенту детерминации.

Для среднедневной интенсивности фотосинтеза сосны использовали уравнение:

$$Ph_{pinus} = aQ^2 + bQ + c + dT^2 + eT + f + gH^2 + h, \quad R^2 = 0,68,$$

где $a = -5,2E-05$; $b = 0,03064$; $c = 30,56618$; $d = -0,019644$; $e = 0,447692$; $f = -38,25345781$; $g = 0,000607$; $h = -4,3428$; Q , T , H – среднедневные интенсивность солнечной радиации, температура и влажность воздуха соответственно.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показано на рис. 5.

Для определения среднедневной интенсивности транспирации сосны в зависимости от внешних факторов использовали уравнение:

$$Tr_{pinus} = aQ^2 + bQ + c + dT^2 + eT + f + gH^2 + hH + i, \quad R^2 = 0,76,$$

где $a = 0,00045$; $b = -0,1239$; $c = 0,85791$; $d = 0,016712$; $e = 1,10788$; $f = 0,88557$; $g = 9,6E-06$; $h = -1,3838$; $i = -12,866$.

Показатели газообмена сосны, вычисленные при разных внешних условиях, соответствовали экспериментальным данным.

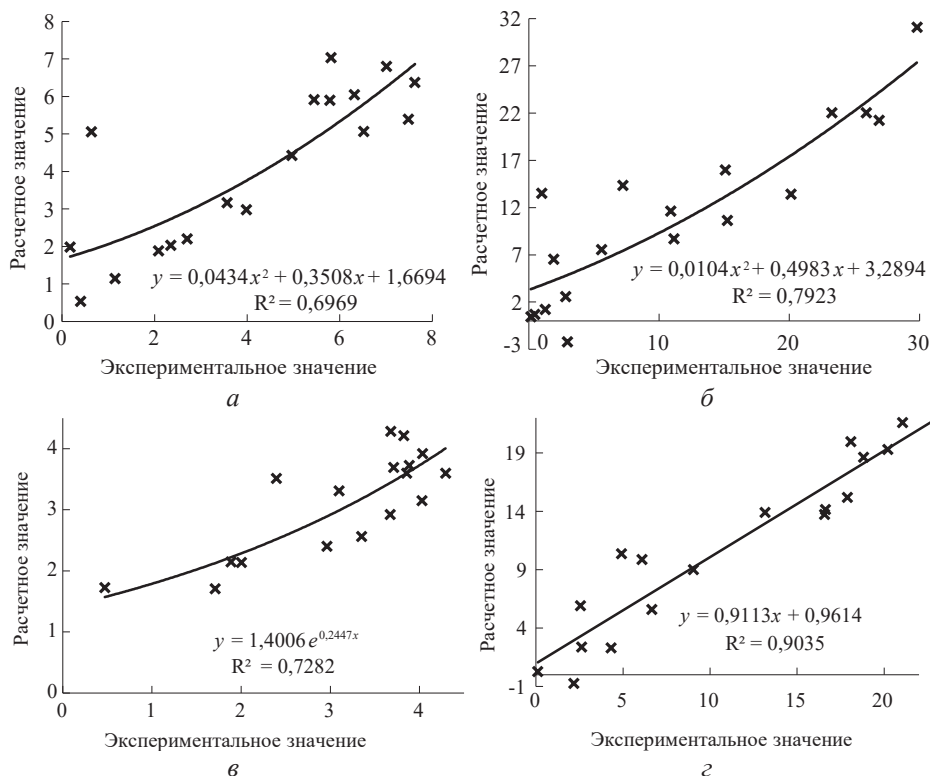


Рис. 5. Взаимосвязь экспериментальных и расчетных значений фотосинтеза (а, в) и транспирации (б, г): а, б – для сосны; в, г – для ели

Fig. 5. Correlation between experimental and calculated values of photosynthesis (а, в) and transpiration (б, г) for: а, б – pine; в, г – spruce

На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны уравнения зависимости фотосинтеза ели от солнечной радиации, температуры и влажности воздуха:

$$Ph_{picea} = aQ^2 + bQ + c + dT + e + fH^2 + gH, \quad R = 0,62,$$

где $a = -8,9E-05$; $b = 0,033865$; $c = 1,010088$; $d = 0,04308$; $e = 0,866702$; $f = 8,6E-05$; $g = -0,05585$.

Газообмен, вычисленный при разных внешних условиях по этой формуле, соответствовал экспериментальным данным.

Для установления среднечасовой интенсивности транспирации ели использовали уравнение:

$$Tr_{picea} = aQ^2 + bQ + c + dT^2 + eT + f + gH^2 + hH + i, \quad R = 0,90,$$

где $a = 0,000179$; $b = 0,02089$; $c = 0,67565$; $d = 0,008067$; $e = 0,351364$; $f = 0,512536$; $g = 0,00299$; $h = 0,239925$; $i = 0,910308$.

Показатели газообмена, вычисленные по формуле, соответствовали экспериментальным.

Таким образом, если для интенсивности фотосинтеза сосны влажность воздуха имеет существенное значение, то для ели этот фактор оказывается еще более значимым.

Заключение

Интенсивность фотосинтеза и транспирации в естественных условиях при оптимальной влажности почвы в начале вегетационного периода в малооблачный день у сосны была более чем на 88 % выше, чем у ели. В облачный день различия были значительно ниже – только 20 %. В малооблачный и в пасмурный дни различия интенсивности транспирации у обеих пород были меньше – 18,5 и 20,0 % соответственно. Следовательно, ель более приспособлена к недостатку света.

Полученные экспериментальные данные позволили рассчитать уравнения зависимости среднедневной интенсивности фотосинтеза сосны от факторов окружающей среды. Расчетные данные по фотосинтезу и транспирации оказались близки экспериментальным. Однако при расчете только по двум показателям – интенсивности солнечной радиации и температуре воздуха – различия между экспериментом и расчетом существенно увеличились, за исключением зависимости для фотосинтеза ели.

Транспирация по характеру зависимости у сосны и ели различается значительно сильнее. Если у сосны различие обусловлено в основном солнечной радиацией, у ели изменения происходят за счет температуры воздуха. По абсолютным показателям транспирация ели при расчете на площадь проекции хвои в камере ниже, чем у сосны на 60 %. По-видимому, при расчете на площадь древостоя транспирация ели будет значительно выше, из этого следует, что ель более требовательна к водообеспечению.

На месте погибших древостоев ели могут произрастать сосновые или смешанные древостои. Сосна по интенсивности фотосинтеза выше ели и более устойчива к недостатку влаги.

Полученные зависимости могут найти применение при параметризации процессов обмена CO_2 и H_2O в моделях биогеохимического цикла в биогеоценозах сосны и ели. Ее дальнейшее уточнение возможно с привлечением информации о влиянии на эти процессы влажности почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алябьев А.Ф. Усыхание ельников в Подмосковье // Лесн. вестн. 2013. № 6. С. 150–166.

Alyabyev A.F. Drying of Spruce Forests in the Moscow Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 6, pp. 150–166. (In Russ.).

2. Болондинский В.К. Динамика CO_2 -газообмена на побегах сосны обыкновенной в условиях Среднетаежной зоны: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2004. 28 с.

Bolondinsky V.K. *Dynamics of CO_2 -Gas Exchange on Shoots of Scots Pine in the Middle Taiga Zone*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Petrozavodsk, 2004. 28 p. (In Russ.).

3. Варлагин А.В. Транспирация на уровне листа, дерева и сообщества в хвойных: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2000. 36 с.

Varlagin A.V. *Transpiration at the Leaf, Tree and Community Levels in Conifers*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2000. 36 p. (In Russ.).

4. Гниненко Ю.И., Хегай И.В. Динамика усыхания еловых лесов в Московском регионе // Лесхоз. информ. 2018. № 2. С. 65–74.

Gninenko Yu.I., Khagai I.V. Dynamics of Shrinking Spruce Forests in the Moscow Region. *Forestry information*, 2018, no. 2, pp. 65–74. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07>

5. Желдак В.И. Концептуальные вопросы лесоводственного обеспечения устойчивого управления еловыми лесами // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 4(28). С. 5–22.

Zheldak V.I. Conceptual Issues of Silvicultural Measures for Spruce Forests Sustainable Management. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2015, no. 4(28), pp. 5–22. (In Russ.).

6. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н., Феклистов П.А., Клевцов Д.Н., Копытов В.В. Оценка состояния хвойных деревьев на вырубках в условиях Европейского Севера // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2015. № 1. С. 85–94.

Zarubina L.V., Konovalov V.N., Feklistov P.A., Klevtsov D.N., Kopytov V.V. Conifers Stand Condition Assessment in the Fellings in a Climate of the European North. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*, 2015, no. 1, pp. 85–94. (In Russ.).

7. Малахова Е.Г., Крылов А.М. Усыхание ельников в Клинском лесничестве Московской области // Изв. СамНЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1(8). С. 1975–1978.

Malakhova E.G., Krylov A.M. The Fir Groves Drying in Klinsky Forestry of Moscow Oblast. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1(8), pp. 1975–1978. (In Russ.).

8. Маслов А.Д. Короед Типограф и усыхание еловых лесов. М.: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.
Maslov A.D. *Eight-Toothed Bark Beetle and Spruce Forests Drying*. Moscow, VNIILM Publ., 2010. 138 p. (In Russ.).

9. Матвеева А.Г. Исследования особенностей усыхания еловых древостоев на Российском Дальнем Востоке // Уч. зап. ТОГУ. 2018. Т. 9, № 1. С. 158–161.

Matveeva A.G. Study of the Drying of Spruce Stands in the Russian Far East. *Scientists Notes of PNU*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 158–161. (In Russ.).

10. Молчанов А.Г. Сравнение фитомассы березняка и сосняка в одинаковых лесорастительных условиях // Лесоводственные исследования в подзоне южной тайги. М.: Наука, 1977. С. 51–60.

Molchanov A.G. Comparison of Phytomass of Birch and Pine Forests in the Similar Forest Growth Conditions. *Forestry Research in the Southern Taiga Subzone*. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 51–60. (In Russ.).

11. Молчанов А.Г. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.

Molchanov A.G. *The CO₂ Balance in Ecosystems of Pine and Oak Forests in Different Forest Areas*. Tula, Grif i K Publ., 2007. 284 p. (In Russ.).

12. Молчанов А.Г. Мониторинг эколого-физиологических показателей в экосистемах // Серебряноборское опытное лесничество: 65 лет лесного мониторинга. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. С. 112–129.

Molchanov A.G. Monitoring of Ecological and Physiological Parameters in Ecosystems. *Serebryanoborsk Experimental Forestry: 65 Years of Forest Monitoring*. Moscow, KMK Publ., 2010, pp. 112–129. (In Russ.).

13. Молчанов А.Г. CO₂ древостоев в естественных условиях // Фотосинтетическая деятельность и продукционные процессы фитоценозов. Вып. 1. Орел: Орел ГАУ, 2014. С. 63–88.

Molchanov A.G. CO₂ of Stands in Natural Conditions. *Photosynthetic Activity and Production Processes of Phytocenoses*. Iss. 1. Orel, Orel SAU Publ., 2014, pp. 63–88. (In Russ.).

14. Молчанов А.Г. Соотношение фотосинтеза и транспирации у сосны и ели в разных условиях окружающей среды // Математическое моделирование в экологии: материалы Седьмой Нац. науч. конф. с междунар. участием. Пушино: ИФХиБПП, 2021. С. 79–81.

Molchanov A.G. The Ratio of Photosynthesis and Transpiration in Pine and Spruce under Different Environmental Conditions. *Mathematical Modeling in Ecology: Proceedings of the 7th National Scientific Conference with International Participation*. Pushchino, IFKHiBPP Publ., 2021, pp. 79–81. (In Russ.).

15. Молчанов А.Г. Интенсивность фотосинтеза саженцев ели, сосны и дуба под пологом леса и на открытом участке в разных условиях водообеспечения // Лесоведение. 2024. № 6. С. 649–660.

Molchanov A.G. Photosynthesis Intensity of Spruce, Pine and Oak Seedlings under Tree Canopy and in the Open Site in Different Water Supply Conditions. *Lesovedenie* = Forest Science, 2024, no. 6, pp. 649–660. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114824060069>

16. Молчанов А.Г., Беляева Е.А. Влияние недостатка водообеспечения на фотосинтез саженцев ели, сосны и дуба // Лесоведение. 2024. № 2. С. 163–172.

Molchanov A.G., Belyaeva Y.A. Water Affecting Photosynthesis of Seedlings Growing in the Open Areas. *Lesovedenie* = Forest Science, 2024, no. 2, pp. 163–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114824020056>

17. Молчанов А.Г., Ольчев А.В. Эмиссия CO₂ с поверхности ствола сосны обыкновенной в разных условиях произрастания // Изв. РАН. Сер.: Биологич. 2020. № 4. С. 423–433.

Molchanov A.G., Olchev A.V. CO₂ Efflux from the Stem Surface of Scots Pine under Various Growing Conditions. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*, 2020, no. 4, pp. 423–433. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002332920030054>

18. Рахи М.О. Аппаратура для исследований компонентов водного потенциала листьев // Физиология растений. 1973. Т. 20. С. 215–221.

Rakhi M.O. Equipment for Studying the Components of the Water Potential of Leaves. *Plant Physiology*, 1973, vol. 20, pp. 215–221. (In Russ.).

19. Сенькина С.Н. Транспирация и устьичное сопротивление сосны обыкновенной в разных условиях произрастания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 6. С. 45–52.

Senkina S.N. Transpiration and Stomatal Resistance of Scotch Pine in Different Growing Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 6, pp. 45–52. (In Russ.).

20. Alexander J.D., Donnelly J.R., Shane J.B. Photosynthetic and Transpiration Responses of Red Spruce Understory Trees to Light and Temperature. *Tree Physiology*, 1995, vol. 15, iss. 6, pp. 393–398. <https://doi.org/10.1093/treephys/15.6.393>

21. Edwards N.N., Sollins P. Continuous Measurement of Carbon Dioxide Evolution from Partitioned Forest Floor Components. *Ecology*, 1973, vol. 54, iss. 2, pp. 406–412. <https://doi.org/10.2307/1934349>

22. Jackson G.E., Irvine J., Grace J. Xylem Cavitation in Scots Pine and Sitka Spruce Saplings During Water Stress. *Tree Physiology*, 1995, vol. 15, iss. 12, pp. 783–790. <https://doi.org/10.1093/treephys/15.12.783>

23. Linder S., Flower-Ellis J. Environmental and Physiological Constraints to Forest Yield. *Responses of Forest Ecosystems to Environmental Change*. Ed. by A. Teller, P. Mathy, J.N.R. Jeffers. Dordrecht, Springer, 1992, pp. 149–164. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2866-7_15

24. Maier-Maercker U. Dynamics of Change in Stomatal Response and Water Status of *Picea abies* During a Persistent Drought Period: A Contribution to the Traditional View of Plant Water Relations. *Tree Physiology*, 1998, vol. 8, iss. 4, pp. 211–222. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.4.211>

25. Maseyk K.S., Green T.G.A., Klinac D. Photosynthetic Responses of New Zealand *Sphagnum* Species. *New Zealand Journal of Botany*, 1999, vol. 37, iss. 1, pp. 155–165. <https://doi.org/10.1080/0028825X.1999.9512621>

26. Ottander C., Campbell D., Öquist G. Seasonal Changes in Photosystem II Organization and Pigment Composition in *Pinus sylvestris*. *Planta*, 1995, vol. 197, pp. 176–183. <https://doi.org/10.1007/BF00239954>

27. *Physical and Physiological Forest Ecology*. Ed. by P. Hary, K. Heliövaara, L. Kulmala. New York, Springer, 2013. 534 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5603-8>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares no conflict of interest

Научная статья

УДК 630.43:58.02:543.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-63-76

Пирогенное воздействие на свойства древесины сосны в северной подзоне тайги

А.А. Красикова^{1✉}, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-5816-2020](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-2026>

*М.А. Гусакова*¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-5528-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2937-2604>

*Н.А. Неверов*¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-5590-2015](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

*М.В. Сурсо*¹, д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр.; ResearcherID: [J-2197-2018](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

*С.С. Хвиюзов*¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-9795-2020](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-2378>

К.Г. Боголицын^{1,2}, д-р хим. наук, гл. науч. сотр., проф.; ResearcherID: [AAA-6432-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-0483>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, г. Архангельск, Россия; ann.krasikova@gmail.com[✉], maria_gusakova@mail.ru, na-neverov@yandex.ru, surso@fciactic.ru, khviuzov.s@yandex.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; k.bogolitsin@narfu.ru

Поступила в редакцию 11.04.25 / Одобрена после рецензирования 03.07.25 / Принята к печати 05.07.25

Аннотация. Леса севера европейской части России хорошо изучены во многих аспектах, однако вопрос влияния пожаров на качество древесины остается раскрытым недостаточно. В ответ на воздействие пирогенного фактора у высших растений формируются специфические реакции аналогично действию климатических стресс-факторов различной природы. Целью работы стало изучение химического состава, свойств и особенностей структуры постпирогенной древесины сосны северной тайги, а также оценка потенциала использования такой древесины в технологиях биорефайнинга. Сосна обыкновенная является хорошим модельным объектом для проведения исследования как типичный представитель светлехвойных лесов, в наибольшей степени подверженных пожарам. Для оценки изменений основных компонентов древесной ткани применялся комплекс физико-химических методов. Отмечена термическая деструкция компонентов древесины (целлюлозы и лигнина) в среднем на 10–13 % под воздействием пирогенной нагрузки, а также снижение содержания углерода и водорода в древесных тканях в наиболее поврежденной пожаром комлевой части жизнеспособных деревьев на 16 и 17 % при увеличении содержания кислорода на 16 %. Выявлено, что тепловое воздействие на ткани стволов сосны обыкновенной во время низового пожара вызывает изменения не только компонентного состава, но и структуры тканей. Отмечено снижение, а затем резкое усиление радиального роста у поврежденных жизнеспособных деревьев спустя несколько лет после пожара. Показано, что древесина поврежденных низовым пожаром средней интенсивности деревьев, отобранная на высоте 1,3 м и выше, по компонентному составу и физико-химическим свойствам не отличается от



контрольных образцов древесины, не подвергавшихся пирогенному воздействию, и может использоваться в качестве сырья в целлюлозно-бумажном производстве.

Ключевые слова: постпирогенная древесина, ядровая древесина, заболонь, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris*, низовой пожар, ИК-спектроскопия

Финансирование: Исследование проведено в рамках госзадания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН.

Благодарности: Использовано оборудование ЦКП НО КТ РФ-Арктика (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН).

Для цитирования: Красикова А.А., Гусакова М.А., Неверов Н.А., Сурсо М.В., Хвиюзов С.С., Боголицын К.Г. Пирогенное воздействие на свойства древесины сосны в северной подзоне тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 63–76.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-63-76>

Original article

Pyrogenic Impact on the Properties of Pine Wood in the Northern Taiga Subzone

Anna A. Krasikova^{1✉}, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAH-5816-2020](https://orcid.org/0000-0001-6040-2026), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-2026>

Maria A. Gusakova¹, Candidate of Engineering, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAB-5528-2019](https://orcid.org/0000-0002-2937-2604), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2937-2604>

Nikolay A. Neverov¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

Mikhail V. Surso¹, Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

Sergey S. Khviyuzov¹, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAH-9795-2020](https://orcid.org/0000-0002-4810-2378), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-2378>

Konstantin G. Bogolitsyn^{1,2}, Doctor of Chemistry, Chief Research Scientist, Prof.;

ResearcherID: [AAA-6432-2019](https://orcid.org/0000-0002-4055-0483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-0483>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia; ann.krasikova@gmail.com[✉], mariya_gusakova@mail.ru, na-neverov@yandex.ru, surso@fciaarctic.ru, khviyuzov.s@yandex.ru

²Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia; k.bogolitsyn@narfu.ru

Received on April 11, 2025 / Approved after reviewing on July 3, 2025 / Accepted on July 5, 2025

Abstract. The forests of the north of European Russia have been well studied in many respects; however, the impact of wildfires on wood quality remains insufficiently understood. In response to pyrogenic stress, higher plants develop specific reactions similar to those triggered by various types of climatic stressors. The research aimed at examining the chemical composition, properties, and structural features of post-pyrogenic wood of northern taiga pine, as well as assessing the potential for using such wood in biorefining technologies. The Scots pine is a good target species for research as a typical representative of light coniferous forests, which are most susceptible to wildfires. A set of physicochemical methods was used to assess changes in the wood tissue main components. We observed thermal degradation of wood components (cellulose and lignin) due to pyrogenic stress (by 10–13 % in average), as well as a decrease in carbon and hydrogen content (by 16 and 17 %, respectively) in wood tissues in

the most fire-damaged butt end of viable trees, along with a 16 % increase in oxygen content. Thermal exposure to the tissues of Scots pine trunks during a ground fire has been found to cause changes not only in the tissue composition but also in the tissue structure. A decrease, followed by a sharp increase in radial growth, was observed in damaged but viable trees several years after the fire. It has been shown that wood of trees damaged by a moderate-intensity ground fire, harvested at a height of 1.3 m and above, does not differ in its chemical composition and physicochemical properties from reference samples of wood that were not exposed to fire stress. Such wood can be used as raw material in the pulp and paper industry.

Keywords: post-pyrogenic wood, core wood, sapwood, Scots pine, *Pinus sylvestris*, ground fire, IR spectroscopy

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Acknowledgements: The equipment of the Center for Collective Use of Scientific Equipment (FECIAR UB RAS) was used in the research.

For citation: Krasikova A.A., Gusakova M.A., Neverov N.A., Surso M.V., Khviyuzov S.S., Bogolitsyn K.G. Pyrogenic Impact on the Properties of Pine Wood in the Northern Taiga Subzone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 63–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-63-76>

Введение

Происходящие во время роста и развития растений природно-климатические или антропогенно-техногенные процессы оказывают воздействие на растительные объекты и приводят к активизации окислительного стресса, проявляющегося в трансформации компонентного химического состава, функционализации отдельных высокоактивных соединений, нарушении жизненного биоцикла.

В ответ на действие климатических стресс-факторов различной природы у высших растений формируются как специфические (увеличение содержания антиоксидантов), так и неспецифические (прооксидантно-антиоксидантные равновесия) адаптивные реакции, зависящие от видоспецифичности растительного организма и от природы и интенсивности стресс-фактора. Окислительный стресс, сопровождающий множество био- и абиотических воздействий, нейтрализуется ответной реакцией антиокислительной системы защиты, что является одним из важных механизмов адаптации растений к изменениям условий среды [20].

Из множества стрессовых состояний следует особое внимание уделить воздействию пирогенного фактора, недостаточно полно изученного для лесов бореальной зоны. Лесные пожары являются одним из наиболее часто встречаемых разрушительных факторов и ежегодно охватывают несколько миллионов гектаров [22, 24]. В наибольшей степени подвержены пожарам суходольные местообитания светлохвойных насаждений с преобладанием сосны и лиственницы [2], что обусловлено их высокой природной пожарной опасностью [3]. Наиболее распространенными являются низовые лесные пожары, на долю которых приходится 97–98 % общего количества лесных пожаров [6].

Следствием пожаров является значительное изменение не только экологических условий на горях, но и самой древесины при пожарах невысокой степени интенсивности. После несильного низового пожара, как правило, остаются слабонарушенные участки гари [15, 16]. Исследования влияния пожаров

на строение, состав и свойства древесины хвойных лесов немногочисленны [10, 13]. Технические качества древесины, подвергшейся воздействию пожара, сильно зависят от вида пожара и времени рубки после пожара. Низовой пожар с высотой пламени до 0,5 м, только снизу опаливший стволы деревьев, незначительно влияет на состояние древостоев, и есть большая вероятность их сохранения [14]. Учитывая важность таких исследований, необходимо, однако, отметить, что однозначной связи между химическим составом древесины, свойствами ее компонентов и воздействием на них процессов, происходящих во время и после пожаров, пока не выявлено. Интенсивное лесопользование и лесные пожары приводят к снижению общих запасов древесины, уменьшению площади хвойных лесов, ввиду чего актуальным представляется исследование состояния древесины, подвергшейся пирогенному воздействию, и поиск путей ее рационального использования.

Целью работы являлось изучение химического состава, свойств и особенностей структуры постпирогенной древесины сосны северной тайги, а также оценка потенциала использования такой древесины в технологиях биорефайнинга. Дополнительные исследования связи между изменением химического состава и структуры древесины хвойных пород и воздействием на них пожаров в настоящее время приобретают большую актуальность и позволяют сформировать единую концепцию обоснованного эффективного использования ресурсов субарктических территорий. Полученные результаты будут способствовать разработке методов наиболее полной утилизации постпирогенной древесины, а также расширению сырьевой базы для комплексной переработки растительного сырья.

Объекты и методы исследования

Полевые исследования проводили в Усть-Двинском участковом лесничестве (Архангельское лесничество) в чистых сосновых древостоях – сосняках кустарничково-сфагновых, осушаемых, пройденных низовыми пожарами средней интенсивности, с давностью пожара 12 лет. Заложено 2 пробные площади (ПП): одна – на гари вблизи осушителя, вторая, не затронутая огнем, – в 100 м от первой. Сосняки относятся к 4-му классу возраста, характеризуются средним диаметром 22 см, средней высотой 18 м и относительной полнотой 0,8.

Классификация пройденных пожарами площадей выполнена с учетом методических рекомендаций И.С. Мелехова [7]. Интенсивность пожара устанавливалась по высоте нагара на стволах [9]. Высота нагара достигала 1,80–2,02 м.

Деревья на старых гарях разделяют на поврежденные жизнеспособные без гнили, поврежденные жизнеспособные с гнилью (усыхающие) и усохшие [12]. В данной работе изучали поврежденные жизнеспособные деревья без гнили в сопоставлении с поврежденными, упавшими в текущий вегетационный период (без признаков усыхания – отсутствие пожелтевшей хвои), и контрольными (неповрежденными). Средний возраст поврежденных жизнеспособных деревьев – 75 лет; поврежденных нежизнеспособных – 50 лет; контрольных – 120 лет.

На гари отбирали спилы древесины (диски) у живых и упавших в текущий вегетационный период деревьев, имеющих зеленую хвою: у поврежденных огнем деревьев – у шейки корня, на высоте 1,3 м и 3 м; у неповрежденных и поврежденных нежизнеспособных – только у комля, т. к. из-за отсутствия

поражения ствола (или его полной пораженности) различия состава и структуры древесины по высоте минимальны. Использовали усредненный образец для каждого типа повреждений.

Исследование структуры древесины – ширины годичного слоя и доли поздней древесины – проводили с помощью измерительного прибора Lintab 6 (Германия) с программным обеспечением TsapWin с точностью 0,01 мм.

Для изучения образцов методом световой микроскопии их нагревали на водяной бане в течение 48 ч, затем помещали в 0,5 н. раствор HCl на 10–12 ч. После мацерации из высечек готовили радиальные микротомные срезы толщиной 12 мкм, которые окрашивали водным раствором метилового зеленого – пиронина G. Временные микротомные препараты просматривали и фотографировали в проходящем свете с помощью прямого лабораторного микроскопа AxioScope A1 (Carl Zeiss, Германия). Полученные изображения редактировали с помощью программного обеспечения AxioVision Release 4.8 (Carl Zeiss). Радиальные сколы образцов древесины после напыления технического золота просматривали и документировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma-Zeiss (Carl Zeiss).

Определение массовой доли химических элементов проводили с помощью анализатора элементного состава (однореакторное исполнение, комплект конфигурации CHN) EuroEA3000 (EuroVector, Италия) с программным обеспечением Callidus. Диапазон измерения массовой доли элемента составляет 0,01–100 %. Среднеквадратичное отклонение случайной составляющей погрешности измерения, массовая доля: C – 0,3; H – 0,1; N – 0,1 %.

Компонентный состав (содержание целлюлозы, лигнина, веществ, экстрагируемых этанолом) образцов древесины определяли согласно общепринятым методикам [8]. Опилки получали измельчением воздушно-сухой щепы в лабораторной роторно-ножевой мельнице (LM-201, Россия) с водяным охлаждением. Для определения компонентного состава образцов использовали фракцию опилок размером 1–2 мм.

Для изучения компонентного состава древесины в сочетании с классическими методами анализа применен метод ИК-Фурье-спектроскопии. ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрофотометре IR Prestige 21 (Shimadzu, Япония) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) MIRacle с призмой ZnSe (Pike, США) относительно воздуха в диапазоне 4000–600 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹ и числом сканирований 128, функция апподизации SqrTriangle. Полученные коэффициенты пропускания преобразованы в единицы оптической плотности обработкой спектров функцией АТР-коррекции с помощью программы IR Solution.

Относительная оптическая плотность углеводной и лигнинной составляющих рассчитаны для количественной оценки изменения содержания основных компонентов в постпирогенной древесине. Оптическую плотность характерных полос поглощения определяли относительно базовой линии, построенной для волновых чисел 4000, 3700, 2400, 1800, 900 см⁻¹ с использованием программы IRSolution [5, 17, 27]. Относительная оптическая плотность получена по следующей формуле:

$$K_i = \frac{D_c}{D_{st}},$$

где D_c и D_{st} – оптическая плотность полосы поглощения компонента и стандартной полосы поглощения при 2920 см⁻¹ соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

Компонентный состав образцов древесины (табл. 1) определяли отдельно для ядра (его доля составляла 70 %) и заболони (30 %) [1].

Таблица 1

Компонентный состав и относительная оптическая плотность лигнинной ($K_{\text{лиг}}$) и полисахаридной ($K_{\text{ув}}$) составляющих древесины сосны обыкновенной
Composition and relative optical density of the lignin ($K_{\text{лиг}}$) and polysaccharide ($K_{\text{ув}}$) components of Scots pine wood

Образец	Содержание лигнина, масс.%, $\pm 0,5$	Содержание целлюлозы, масс.%, $\pm 0,7$	Вещества, экстрагируемые этанолом, масс.%, $\pm 0,3$	$K_{\text{лиг}}$	$K_{\text{ув}}$	$K_{\text{лиг}}/K_{\text{ув}}$
Поврежденный жизнеспособный, спил у комля, ядро	25,9	42,0	10,2	0,23	1,08	0,21
Поврежденный жизнеспособный, спил у комля, заболонь	24,2	42,7	10,6	0,27	1,19	0,23
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 1,3 м, ядро	27,4	46,7	5,3	0,35	1,75	0,20
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 1,3 м, заболонь	27,8	46,5	4,0	0,27	1,18	0,23
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 3 м, ядро	27,9	49,4	3,9	0,37	1,67	0,22
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 3 м, заболонь	26,4	45,7	3,5	0,36	1,76	0,20
Поврежденный нежизнеспособный, ядро	24,4	41,6	11,9	0,12	0,35	0,34
Поврежденный нежизнеспособный, заболонь	24,9	49,5	2,5	0,36	1,78	0,20
Контрольный, ядро	25,0	45,3	10,0	0,16	0,81	0,20
Контрольный, заболонь	25,5	51,3	3,2	0,29	1,33	0,22
Сосна обыкновенная, ядро*	30,9	43,5	4,8	—	—	—
Сосна обыкновенная, заболонь*	28,7	45,9	1,8	—	—	—

*По литературным данным для сосны обыкновенной, произрастающей в Архангельской области [23].

Из множества факторов, играющих роль в синтезе компонентов растительного сырья, влияние окружающей среды, особенно экстремальные условия, является решающим и определяет колебания содержания компонентов в растениях. Так, отмечены явно выраженные различия в содержании целлюлозы по градиенту высоты дерева, поврежденного пожаром. В нижней части ствола, наиболее пострадавшей от пожара, содержание целлюлозы минимальное

(42,0–42,7 %), что, очевидно, связано с термической деструкцией целлюлозных волокон в нижней части ствола под воздействием пирогенной нагрузки. Содержание целлюлозы в верхних частях дерева (на отметке 1,3 м и выше) практически не меняется по градиенту высоты и соответствует среднему содержанию целлюлозы согласно литературным данным. Показано более высокое содержание целлюлозы в ядровой части исследуемых образцов древесины по сравнению с заболонью, согласующееся с литературными данными [23].

Для поврежденных и неповрежденных образцов характерно повышенное содержание лигнина в ядровой части дерева, что в целом справедливо для хвойных пород [23, 26], и – уменьшенное в нижней части ствола, обусловленное разрушением компонентов под воздействием высоких температур, как и для целлюлозы.

Согласно литературным данным, для здоровой древесины сосны содержание веществ, экстрагируемых этанолом, составляет от 1,7 % (в заболони) до 5,7 % (в ядровой части). В ядровой части древесины почти у всех образцов отмечено более высокое (в 1,2–4,5 раза) содержание экстрактивных веществ в сравнении с заболонной частью, что сопоставимо с литературными данными [18, 21]. Данная тенденция нарушается только для поврежденного пожаром жизнеспособного дерева, в комлевой части которого количество экстрактивных веществ как в ядре, так и в заболони примерно одинаково (10,2–10,6 %). При пожаре, вероятно, повреждаются и разрываются смоляные ходы, что приводит к значительному увеличению содержания экстрактивных веществ в заболони нижней части ствола, наиболее поврежденной пожаром.

Для дополнительной оценки воздействия пирогенной нагрузки на химический состав древесины сосны исследован элементный состав 3 годичных колец, сформировавшихся до пожара, и 3 после для заболони в комлевой части поврежденного жизнеспособного дерева. Полученные данные подтверждают термическую деструкцию компонентов древесины под воздействием пирогенной нагрузки. Так, в результате пожара снижается содержание углерода и водорода в древесных тканях на 16 и 17 % соответственно и увеличивается содержание кислорода на 16 % (табл. 2).

Таблица 2

Элементный состав, %, образцов заболони постпирогенной древесины сосны обыкновенной
Elemental composition, %, of sapwood samples of post-pyrogenic Scots pine wood

Древесина	О	С	Н	N
Допожарная	49,6	44,8	5,5	0,2
Послепожарная	57,9	37,5	4,5	0,1

Для оценки происходящих в процессе пожара изменений древесных тканей применяются разрушающие и неразрушающие методы. Так, для детального изучения изменения содержания основных компонентов древесины под воздействием пирогенной нагрузки использована ИК-спектроскопия (рис. 1). ИК-спектры всех образцов имеют схожий вид, что указывает на отсутствие качественных различий в функциональной природе основных компонентов. Для анализируемых ИК-спектров характерны следующие полосы поглощения отдельных компонентов и связей между ними: интенсивная полоса поглощения валентных колебаний связей О-Н, участвующих в водородных связях, при 3200–3500 см⁻¹; полоса при 3000–2800 см⁻¹, обусловленная валентными коле-

баниями связей в CH - и CH_2 -группах; при $1735\text{--}1740\text{ см}^{-1}$ – валентными колебаниями C=O -групп. Поглощение при 1650 см^{-1} является следствием наличия связанной воды в древесине; при 1160 , 1107 , 1060 и 1033 см^{-1} – валентных колебаний эфирных связей C-O ; при 900 и 663 см^{-1} – деформационных колебаний связей C-H . Скелетные колебания ароматического кольца лигнина проявляются при полосах 1605 , 1510 , 1425 см^{-1} [4, 5, 25, 27].

Основные различия исследованных спектров отражаются в интенсивности полос поглощения при 3420 , 1740 , 1508 и 1060 см^{-1} , что вызвано изменением структуры и состава древесины в результате пирогенного воздействия. Полученные данные характеризуют заболонь поврежденного жизнеспособного образца относительно меньшим содержанием углеводов по сравнению с образцами заболони контрольного и усыхающего образцов, что согласуется с данными табл. 1. Для поврежденного усыхающего образца свойственна интенсивная полоса поглощения при 1740 см^{-1} , свидетельствующая о повышении содержания карбонильных групп, что является следствием окислительных процессов, протекающих при гниении и деструкции древесины.

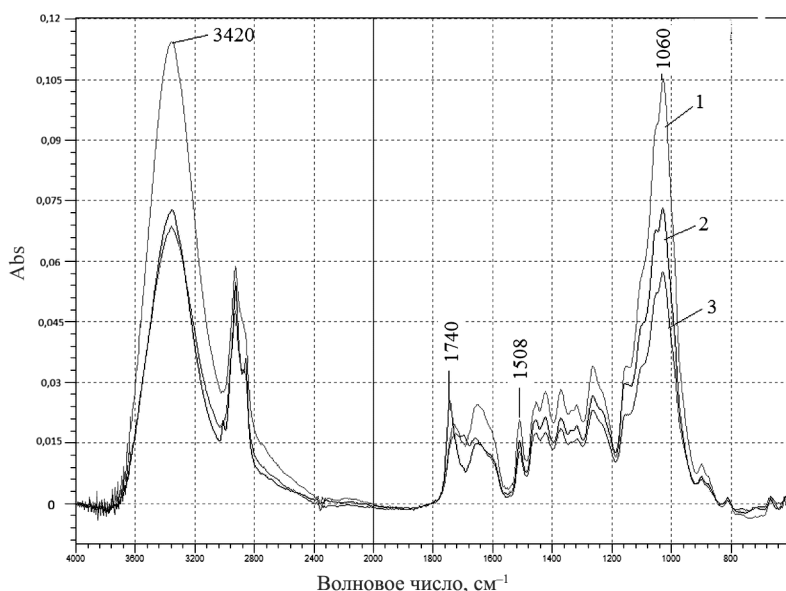


Рис. 1. ИК-спектры образцов древесины: 1 – поврежденная усыхающая; 2 – поврежденная жизнеспособная; 3 – контрольная

Fig. 1. IR spectra of wood samples: 1 – damaged drying; 2 – damaged viable; 3 – reference

Для количественной оценки относительного содержания основных компонентов (лигнина и полисахаридов) рассчитана относительная оптическая плотность древесины образцов. При характеристике содержания лигнина использовалась интенсивная полоса 1508 см^{-1} , вызванная скелетными колебаниями ароматических колец. Для исследования углеводной составляющей выбрана интенсивная полоса при 1060 см^{-1} , обусловленная валентно-симметричными колебаниями C-O -связей.

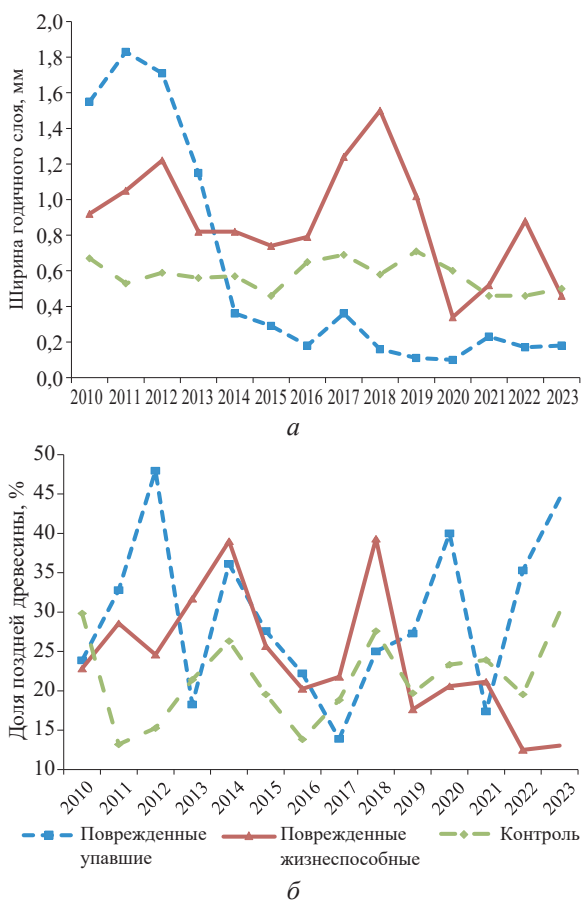
Данные об относительной оптической плотности лигнинной и полисахаридной составляющих в исследованных образцах подтверждают изменения химического состава, которые проявляются под воздействием пирогенной нагрузки. Отмечено снижение общего содержания полисахаридов в наиболее

поврежденной пожаром комлевой части жизнеспособных деревьев, что согласуется со значениями, полученными химическими методами. Повышенное значение показателя $K_{\text{лиг}}$ для ядровой части древесины у образцов, отобранных на высоте 1,3 и 3 м и не поврежденных пожаром, вероятно, обусловлено термической деструкцией компонентов в нижней части ствола. Однако отмеченные изменения содержания лигнинной и полисахаридной составляющих в исследованных образцах в целом не привели к увеличению или уменьшению соотношения $K_{\text{лиг}}/K_{\text{ув}}$ – для всех образцов оно осталось постоянным и составило 0,20–0,22, что сопоставимо со значениями, полученными для контрольного образца.

Тепловое воздействие на ткани стволов сосны обыкновенной во время низового пожара вызывает изменения не только компонентного состава, но и жизнедеятельности клеток и, как следствие, структурные изменения тканей в целом [10]. С применением методов дендрохронологического анализа показано, что ширина годичного слоя у усредненного контрольного образца, не поврежденного пожаром, находится примерно на одном уровне и колеблется от 0,5 до 0,7 мм (рис. 2).

Рис. 2. Макроструктура древесины сосны: *a* – ширина годичного слоя; *б* – доля поздней древесины

Fig. 2. Macrostructure of pine wood: *a* – annual ring width; *б* – late wood content



Отмечено, что посттравматический синдром у поврежденных жизнеспособных деревьев начинает проявляться спустя несколько лет после пожара и заключается в резком усилении радиального роста. Так, толщина годичного слоя в комлевой части сначала снижается на протяжении нескольких лет, а затем резко увеличивается (до 1,5 мм в среднем), что обусловлено активным ростом дерева

за счет увеличения аэрации и содержания минеральных элементов в почве в результате низового пожара и сгорания лесной подстилки и живого напочвенного покрова. Наибольшие колебания ширины годичного кольца наблюдались для поврежденных упавших деревьев. Так, максимальная ширина годичного кольца (1,8 мм) у деревьев, произрастающих вблизи осушителя, отмечена в год перед прохождением пожара. Затем наблюдалось резкое закономерное падение этого показателя до минимума – 0,1–0,2 мм, связанное с замедлением, а затем полным прекращением ростовых процессов у упавших деревьев сосны. Стоит отметить, что в сосняках кустарничково-сфагновых осушаемых происходит выгорание подстилки и очеса, что приводит к повреждению корней, заражению древостоев дереворазрушающими грибами и выпадению поврежденных деревьев [11].

По соотношению толщины слоев поздней и ранней древесины рассчитана доля поздней древесины в годичном кольце. Так, доля поздней древесины в поврежденном жизнеспособном образце составила 24,1 %. Наименьшее содержание поздней древесины отмечено в контрольном образце (21,6 %), наибольшее – в поврежденном упавшем (29,4 %), что, очевидно, обусловлено замедлением роста и уменьшением ширины годичного слоя в процессе усыхания дерева.

Реакция дерева на воздействие пожара зависит не только от интенсивности и продолжительности огневого воздействия, но также от периода вегетации и толщины коры. Для микроскопических исследований был выбран поперечный спил ствола поврежденного пожаром жизнеспособного дерева сосны с участками, различающимися по толщине коры (рис. 3).

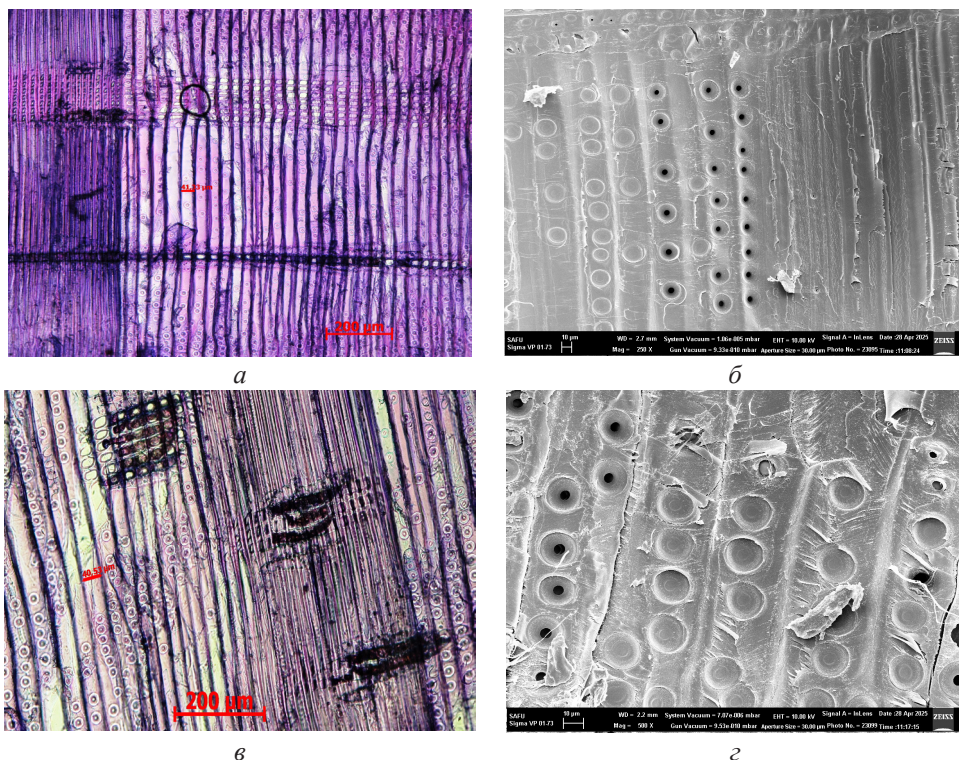


Рис. 3. Анатомическое строение постпирогенной древесины сосны после низового пожара на участках годичного кольца под корой: а, б – толстой; в, з – тонкой

Fig. 3. Anatomical structure of post-pyrogenic pine wood after a ground fire as observed in sections of the annual ring beneath the: а, б – thick bark; в, з – thin bark

На рис. 3, *а*, *б* показан периферийный участок с широкими годичными кольцами, сформировавшимися под толстой (14 мм) корой, на рис. 3, *в*, *г* – участок с узкими кольцами под тонкой (3 мм) корой. Резкое усиление радиального роста на участке ствола под толстой корой произошло в последние 3 года, т. е. спустя 10–12 лет после пожара. Ширина слоев ранней древесины в годичных кольцах в этом секторе составила 1,38–1,50 мм, поздней древесины – 0,69–0,74 мм. На участке под тонкой корой ширина слоев ранней древесины в этих же годичных кольцах сохранилась на уровне предыдущих лет и составила 0,74–0,78 мм, поздней – 0,23–0,25 мм. Отношение доли поздней древесины к ранней на участке под толстой корой уменьшилось по сравнению с участком под тонкой корой в среднем на 68 %. Визуально отмечено увеличение диаметров ранних трахеид на участке под толстой корой в периферийных годичных кольцах, однако вариабельность признака в границах годичного кольца высокая, и эти различия не превышают основную ошибку среднего значения. В целом все структурные анатомические элементы ксилемы у деревьев сосны, выживших после пожара, сохраняются. Проявившийся постпирогенный эффект носит латентный характер, обусловленный усилившейся камбиальной деятельностью, которую можно рассматривать как компенсаторную реакцию дерева на стресс и повышение содержания в почве доступных зольных элементов.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало, что образцы древесины, отобранные у поврежденных низовым пожаром средней интенсивности жизнеспособных деревьев на высоте 1,3 м и выше, по компонентному составу и физико-химическим свойствам достоверно не отличаются от контрольных образцов древесины, не подвергавшихся пирогенному воздействию, поэтому данная древесина может использоваться в качестве сырья в целлюлозно-бумажном производстве.

Показано, что в комлевой части деревьев под воздействием пирогенной нагрузки происходит термическая деструкция всех основных полимерных компонентов лигноуглеводного комплекса древесины [19], приводящая к равномерному снижению содержания углеводов и лигнина в среднем на 10–13 %. Отмечено, что диаметр трахеид и количество окаймленных пор в ранней и поздней древесине в целом не меняются и соответствуют норме. Это позволяет рекомендовать подобную древесину в качестве сырья в технологиях комплексной химической переработки, таких как целлюлозно-бумажное производство. Предпочтительным способом переработки может являться получение целлюлозы высокого выхода с более тщательными стадиями окорки и сортирования щепы для исключения попадания обгоревшей древесины в технологический процесс. Изготовленную таким образом целлюлозу можно использовать в качестве добавки к макулатурному сырью при производстве различных видов бумажной продукции.

Заключение

На примере сосны обыкновенной исследована ответная реакция высших растений на стрессовое пирогенное воздействие, выражающаяся в изменении содержания входящих в состав древесины компонентов. Дана оценка послепожарной трансформации некоторых физико-химических и морфологических свойств древесины сосны обыкновенной как одной из основных лесобразую-

щих хвойных пород Европейского Севера России. Показано, что воздействие низовых пожаров средней интенсивности вызывает термическую деструкцию основных полимерных компонентов в комлевой части древесины – снижение содержания целлюлозы и лигнина. Образцы древесины, отобранные у поврежденных жизнеспособных деревьев на высоте 1,3 м и выше по компонентному составу и физико-химическим свойствам не отличаются от контрольных образцов древесины, не подвергавшихся пирогенному воздействию. Рекомендована вырубка постпирогенных деревьев сразу после прохождения пожаров, независимо от высоты нагара, поскольку происходит выгорание подстилки, что приводит к их дальнейшему выпадению.

Результаты, полученные в ходе данного исследования, позволяют оценить влияние пожаров на качество древесины хвойных, произрастающих в средней и северной подзонах тайги, и дать рекомендации по химической переработке постпирогенной древесины как одного из возможных направлений ее использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арсеньева Т.В., Чавчавадзе Е.С. Эколого-анатомические аспекты изменчивости древесины сосновых из промышленных районов европейского севера. СПб.: Наука, 2001. 109 с.

Arsenyeva T.V., Chavchavadze E.S. *Ecological and Anatomical Aspects of the Pine Wood Variability in Industrial Areas of the European North*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 109 p. (In Russ.).

2. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A. Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 83–94. (In Russ.).

3. Иванова Г.А., Конард С.Г., Макрае Д.Д., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Иванов А.В., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Кукавская Е.А., Орешков Д.Н., Перевозникова В.Д., Самсонов Ю.Н., Сорокин Н.Д., Тарасов П.А., Цветков П.А., Шишикин А.С. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.

Ivanova G.A., Konard S.G., Makraye D.D., Bezkorovaynaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Kukavskaya E.A., Oreshkov D.N., Perevznikova V.D., Samsonov Yu.N., Sorokin N.D., Tarasov P.A., Tsvetkov P.A., Shishikin A.S. *The Impact of Fires on the Ecosystem Components of Siberian Middle Taiga Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014. 232 p. (In Russ.).

4. Карклин В.Д. ИК-спектроскопия древесины и ее основных компонентов. V. Количественное сравнение ИК-спектров древесины на основе внешнего стандарта – гексаферрицианида калия // Химия древесины. 1975. № 1. С. 56–62.

Karklin' V.D. IR Spectroscopy of Wood and Its Major Components. V. Quantitative Comparison of IR Spectra of Wood Based on an External Standard – Potassium Hexaferriicyanide. *Khimiya drevesiny*, 1975, no. 1, pp. 56–62. (In Russ.).

5. Котлярова И.А. ИК-спектроскопия древесины сосны, березы и дуба, модифицированной моноэтаноламин(N→B)тригидроксидом // Химия растит. сырья. 2019. № 2. С. 43–49.

Kotlyarova I.A. Infrared Spectroscopy of Wood of Pine, Birch and Oak, Modified with Monoethanolamine(n→b)threehydroxyborate. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of plant raw material, 2019, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.14258/jcprm.2019024609>

6. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Гос. лесотехн. изд-во, 1948. 126 с.
Melekhov I.S. *The Impact of Fires on Forests*. Moscow, Goslestekhizdat Publ., 1948. 126 p. (In Russ.).
7. Мелехов И.С., Душа-Гудым С.И. Лесная пирология. М.: МЛТИ, 1979. 80 с.
Melekhov I.S., Dusha-Gudym S.I. *Forest Pyrology*. Moscow, MLTI Publ., 1979. 80 p. (In Russ.).
8. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
Obolenskaya A.V., Yelnitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratory Work on Wood and Cellulose Chemistry*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 320 p. (In Russ.).
9. Савченко А.Г. Методологические аспекты изучения влияния низовых пожаров на лес // Изв. вузов. Лесн. журн. 1987. № 4. С. 27–31.
Savchenko A.G. Methodological Aspects of Studying the Impact of Ground Fires on Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1987, no. 4, pp. 27–31. (In Russ.).
10. Стасова В.В., Зубарева О.Н., Иванова Г.А. Анатомические характеристики луба ствола сосны обыкновенной после лесного пожара // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 74–86.
Stasova V.V., Zubareva O.N., Ivanova G.A. Anatomical Features of the Scots Pine Stem Phloem after Forest Fire. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 1, pp. 74–86. (In Russ.).
11. Тюкавина О.Н. Теплотворная способность постпирогенной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Актуальн. проблемы лесн. комплекса. 2022. № 62. С. 332–333.
Tyukavina O.N. Calorific Value of Postpyrogen Pine Wood (*Pinus sylvestris* L.). *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2022, no. 62, pp. 332–333. (In Russ.).
12. Тюкавина О.Н., Гудина А.Г. Теплотворная способность постпирогенной древесины сосны // Лесотехн. журн. 2020. № 2. С. 188–195.
Tyukavina O.N., Gudina A.G. Heating Capability of Postpyrogen Pine Wood. *Lesotekhnicheskij Zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2020, no. 2, pp. 188–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>
13. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Адаи Д.М. Теплотворная способность древесины сосны в культурах северотаежного лесного региона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 82–91.
Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Adaj D.M. Calorific Value of Pine Wood in Crops of the Northern Taiga Forest Area. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 82–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-82-91>
14. Тюкавина О.Н., Феклистов П.А. Пожароустойчивость сосновых древостоев на севере Архангельской области // Лесоведение. 2019. № 6. С. 501–511.
Tyukavina O.N., Feklistov P.A. Fire Resilience of Pine Stands in the North of Arkhangelsk Oblast. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 501–511. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819060111>
15. Фуряев В.В., Заболоцкий В.И., Черных В.А. Пожароустойчивость сосновых лесов. Новосибирск: Наука, 2005. 160 с.
Furyaev V.V., Zabolotsky V.I., Chernykh V.A. *Fire Resistance of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 160 p. (In Russ.).
16. Фуряев В.В., Киреев Д.М. Изучение послепожарной динамики лесов на ландшафтной основе. Новосибирск: Наука, 1979. 160 с.
Furyaev V.V., Kireev D.M. *A Landscape-Based Study of Post-Fire Forest Dynamics*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 160 p. (In Russ.).
17. Хвиюзов С.С., Боголицын К.Г., Гусакова М.А., Зубов И.Н. Оценка содержания лигнина в древесине методом ИК фурье-спектроскопии // Фундамент. исследования. 2015. № 9-1. С. 87–90.

Khviyuzov S.S., Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Zubov I.N. Estimation of Lignin Content in the Wood by the Method of FTIR Spectroscopy. *Fundamental research*, 2015, no. 9-1, pp. 87–90. (In Russ.).

18. Barros J., Serk H., Granlund I., Pesquet E. The Cell Biology of Lignification in Higher Plants. *Annals of Botany*, 2015, vol. 115(7), pp. 1053–1074.

<https://doi.org/10.1093/aob/mcv046>

19. Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Krasikova A.A. Molecular Self-Organization of Wood Lignin–Carbohydrate Matrix. *Planta*, 2021, vol. 254, art. 30.

<https://doi.org/10.1007/s00425-021-03675-4>

20. Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Krasikova A.A., Khviyuzov S.S., Samsonova N.A., Selivanova N.V., Pustynnyaya M.A. Dynamics of the Processes of Formation and Accumulation of Phenolic and Pigment Complexes in the Needles of Pine *Pinus sylvestris*. *Plant Physiology Reports*, 2024, vol. 29, pp. 385–394. <https://doi.org/10.1007/s40502-024-00795-3>

21. Campbell A.G., Kim W.-J., Koch P. Chemical Variation in Lodgepole Pine with Sapwood/Heartwood, Stem Height, and Variety. *Wood and Fiber Science*, 1990, vol. 22, pp. 22–30.

22. Cutler N.A., Arróniz-Crespo M., Street L.E., Jones D.L., Chaput D.L., Deluca T.H. Long-Term Recovery of Microbial Communities in the Boreal Bryosphere Following Fire Disturbance. *Microbial Ecology*, 2017, vol. 73, no. 1, pp. 75–90.

<https://doi.org/10.1007/s00248-016-0832-7>

23. Gusakova M., Khviyuzov S., Bogolitsyn K., Krasikova A. Changes in the Content of the Main Components of Wood During the Life Cycle of Higher Plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2024, vol. 94, pp. 727–732. <https://doi.org/10.1007/s40011-024-01597-1>

24. Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Ivanova G.A., Conard S.G., Kalenskaya O.P., Zhila S.V. et al. Influence of Logging on the Effects of Wildfire in Siberia. *Environmental Research Letters*, 2013, vol. 8, no. 4, art. 045034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045034>

25. Lin S.Y., Dence C.W. *Methods in Lignin Chemistry*. Berlin, Springer, 1992. 578 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7>

26. Raiskila S., Pulkkinen M., Laakso T., Fagerstedt K., Löija M., Mahlberg R., et al. FTIR Spectroscopic Prediction of Klason and Acid Soluble Lignin Variation in Norway Spruce Cutting Clones. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41(2), pp. 351–371. <https://doi.org/10.14214/sf.301>

27. Vartanian E., Barres O., Roque C. FTIR Spectroscopy of Woods: A New Approach to Study the Weathering of the Carving Face of a Sculpture. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, vol. 136, part C, pp. 1255–1259.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.10.011>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Научная статья

УДК 581.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-77-95

Виталитетная структура древостоев природного парка «Питомник им. Лукашова»

Г.Ю. Морозова[✉], канд. биол. наук; ResearcherID: [M-6380-2017](https://orcid.org/0000-0003-1183-3430),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1183-3430>

И.Д. Дебелая, канд. геогр. наук; ResearcherID: [M-6392-2017](https://orcid.org/0000-0002-0191-2306),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0191-2306>

Л.А. Антонова, канд. биол. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3059-3305>

Е.М. Климина, канд. геогр. наук; ResearcherID: [AAS-8095-2020](https://orcid.org/0000-0003-0442-484X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0442-484X>

А.В. Остроухов, канд. геогр. наук; ResearcherID: [G-1297-2018](https://orcid.org/0000-0002-9203-9097),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9097>

К.В. Ионкин, мл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3137-9752>

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия;

morozova-iverp@mail.ru[✉], debelaya@rambler.ru, levczik@yandex.ru, kliminaem@bk.ru,

ostran2004@bk.ru, ionkin.1983@inbox.ru

Поступила в редакцию 25.04.25 / Одобрена после рецензирования 08.07.25 / Принята к печати 11.07.25

Аннотация. На постагрогенных территориях в отсутствии ухода происходит деградация посадок плодовых растений, активизируются процессы лесовосстановления, олуговения и рудерализации растительных сообществ залежей и пустырей. Цель исследования – изучение состояния растительного покрова природного парка «Питомник им. Лукашова» (особо охраняемая природная территория), анализ изменений жизненного состояния древостоев садовых насаждений и лесных сообществ после аграрного использования территории для разработки эффективных мероприятий по снижению антропогенных рисков. Жизнеспособность насаждений определяли по коэффициенту относительного жизненного состояния. Картирование координат древесно-кустарниковых растений проведено с помощью GNSS-приемника (глобальные навигационные спутниковые системы). Показано, что древостои в основном характеризуются ослабленным состоянием. Биологическое разнообразие дендрофлоры повышается за счет внедрения лесных и инвазивных древесных видов. Общая площадь парка составляет 163,943 га, из которых растительный покров занимает 153,785 га. Сравнительный анализ выявил сокращение площади садов в 1,6 раза по сравнению с 1993 г., площади кустарниковых плантаций – в 3,2 раза. Площадь лесополос и вторичных лесов увеличилась в 1,6 раз. Ландшафтный комплекс территории относится к садово-парковому с преимущественной долей природно-антропогенных (измененных) ландшафтов – 70 % территории, а также условно природных (слабоизмененных) – 23,8 %. Антропогенно-техногенные участки расположены на окраинах парка – 6,2 %. Большую часть площади парка занимает лесной массив, в котором преобладают древесно-кустарниковые насаждения (60,7 %), лугово-кустарниковые сообщества составляют 33,0 %. Плодовые насаждения и естественная растительность характеризуются ослабленным состоянием, индекс жизненности изменялся от 59,57 до 78,09 %, за исключением насаждений вторичных осинового леса (81,39 %) и разреженных лесных насаждений

среди лугово-кустарниковой растительности (82,46 %). Среди лугово-кустарниковой растительности сформировались сильно ослабленные ивовые редколесья (32,14 %). Результаты могут быть применены в области регионального управления и планирования.

Ключевые слова: особо охраняемая природная территория, ландшафт, древесные насаждения, плодово-ягодные посадки, лесовосстановление, видовая структура, относительное жизненное состояние, природный парк, Дальневосточный федеральный округ

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств госзадания Министерства науки и высшего образования России ИВЭП ДВО РАН (проект № 121021500060–4).

Благодарности: Авторы искренне благодарят Г.С. Ткачука, М.И. Вернослову и Л.М. Панченко за помощь в обследовании зеленых насаждений природного парка.

Для цитирования: Морозова Г.Ю., Дебелая И.Д., Антонова Л.А., Климина Е.М., Остроухов А.В., Ионкин К.В. Виталитетная структура древостоев природного парка «Питомник им. Лукашова» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 77–95. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-77-95>

Original article

Vitality Structure of Tree Stands in the Lukashov Nursery Nature Park

Galina Yu. Morozova[✉], *Candidate of Biology*; ResearcherID: [M-6380-2017](https://orcid.org/0000-0003-1183-3430),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1183-3430>

Irina D. Debelaya, *Candidate of Geography*; ResearcherID: [M-6392-2017](https://orcid.org/0000-0002-0191-2306),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0191-2306>

Lyubov A. Antonova, *Candidate of Biology*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3059-3305>

Elena M. Klimina, *Candidate of Geography*; ResearcherID: [AAS-8095-2020](https://orcid.org/0000-0003-0442-484X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0442-484X>

Andrey V. Ostroukhov, *Candidate of Geography*; ResearcherID: [G-1297-2018](https://orcid.org/0000-0002-9203-9097),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9097>

Konstantin V. Ionkin, *Junior Research Scientist*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3137-9752>

Institute of Water and Ecology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science, Khabarovsk, Russia; morozova-ivep@mail.ru[✉], debelaya@rambler.ru, levczik@yandex.ru, kliminaem@bk.ru, ostran2004@bk.ru, ionkin.1983@inbox.ru

Received on April 25, 2025 / Approved after reviewing on July 8, 2025 / Accepted on July 11, 2025

Abstract. The lack of maintenance in post-agrogenic lands leads to the deterioration of plantations with fruit-bearing plants and accelerates the processes of reforestation, transformation into meadow, and ruderalization of plant communities in fallow fields and wastelands. The research aims at examining the vegetation cover of the Lukashov Nursery Nature Park (a specially protected natural area) and analyzing changes in the vital state of tree stands in orchard plantations and forest communities following the area's agricultural use, thereby developing effective measures to mitigate anthropogenic risks. The vitality of plantations was determined using the relative vitality index. The coordinates of the trees and shrubs in the nature park were mapped using a Global Navigation Satellite Systems (GNSS) receiver. The tree stands have been shown to be primarily in a weakened state. The biological diversity of the tree population increases due to the introduction of native and invasive tree species. The park covers a total area of 163.943 ha, out of which vegetation occupies 153.785 ha. A comparative analysis revealed

that the area of orchards had decreased by 1.6 times compared to 1993, while the area of shrub plantations had decreased by 3.2 times. The area of forest strips and secondary forests has increased by 1.6 times. The landscape area is classified as orchard and park-like, with natural and anthropogenic (modified) landscapes accounting for 70 % of the total area, and semi-natural (slightly modified) landscapes accounting for 23.8 %. Areas affected by human activity and industrial development are located on the edges of the park and account for 6.2 %. Most of the park's area is covered by a forest, dominated by tree and shrub vegetation (60.7 %), while meadow and shrub communities account for 33.0 %. Fruit-bearing plantations and natural vegetation are in a weakened state, with a vitality index ranging from 59.57 to 78.09 %, except for secondary aspen forests (81.39 %) and sparse forest plantations among meadow and shrub vegetation (82.46 %). Weakened willow sparse woods (32.14 %) have formed within the meadow and shrub vegetation. The research results are applicable for regional management and planning.

Keywords: specially protected natural area, landscape, tree plantations, fruit and berry plantations, reforestation, species composition, relative vitality, natural park, Far Eastern Federal District

Funding: The research was financially supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education through the state assignment for the Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS (Project No. 121021500060–4).

Acknowledgments: The authors would like to sincerely thank G.S. Tkachuk, M.I. Vernoslav, and L.M. Panchenko for their assistance in surveying the green spaces of the nature park.

For citation: Morozova G.Yu., Debelaya I.D., Antonova L.A., Klimina E.M., Ostroukhov A.V., Ionkin K.V. Vitality Structure of Tree Stands in the Lukashov Nursery Nature Park. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 77–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-77-95>

Введение

Среди основных тенденций формирования современного городского пространства выделяется направленность на организацию особо охраняемых природных территорий (ООПТ), которые приобретают статус многофункциональных объектов. Исследование городских ООПТ привлекает внимание не только российских [2, 6, 7, 16, 17, 20], но и зарубежных ученых [24–30]. Эти территории представляют ценность для местного сообщества в природоохранном, научном, образовательном, культурном, эстетическом, рекреационном отношениях и способствуют формированию высокого качества жизни. Поэтому стратегически важно присваивать статус ООПТ крупным озелененным городским участкам с наличием соответствующих природных факторов, практикой заселения и хозяйственного освоения, институциональными изменениями, современными реалиями регионального развития, традициями градостроения. В сеть ООПТ в городах России включали озелененные территории, в т. ч. выведенные из хозяйственного оборота. Специфика дальневосточных городских ООПТ проявляется во включении в них значительных по площади участков дикой природы – зон покоя, ресурсных резерватов, охраняемых природных ландшафтов, а также постагрогенных территорий – питомников [6]. Потребности в таких территориях растут по мере обострения экологических и социальных проблем в крупных городах.

Питомник был заложен 31 июля 1934 г. на площади 60 га. Он служил основой развития дальневосточного садоводства и примером эффективной

аграрной деятельности. В период остановки производства в 1997 г. зеленому массиву присвоен юридический статус и категория «памятник природы краевого значения» по постановлению главы администрации Хабаровского края от 24.01.1997. № 7 «Об особо охраняемых природных территориях Хабаровского края». В 2020 г. ООПТ была преобразована в природный парк «Питомник им. Лукашова» по постановлению правительства Хабаровского края от 24.08.2020 № 352-пр «Об изменении категории особо охраняемой природной территории краевого значения» с целью сохранения, изучения и обогащения коллекции плодово-ягодных растений, имеющих научное, селекционное и хозяйственное значение, развития туризма и рекреации, просвещения населения. В центрах с высокими темпами урбанизации Федеральный закон «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 N 33-ФЗ (ред. от 08.08.2024) возлагает на природные парки задачи сохранения природных ландшафтов, эксплуатации рекреационных ресурсов ООПТ, а также внедрения эффективных методов охраны природы и поддержания экологического баланса в условиях рекреации.

Социально-экономический кризис начала 1990-х гг., поразивший и отечественное сельское хозяйство страны, привел к остановке использования многих пастбищ, сенокосов и пашен. Эти же причины обусловили запустение садов и питомников. При отсутствии агротехнического ухода произошли изменения структуры постагрогенных ценозов, активизировались механизмы лесовосстановления [1, 5, 12, 21]. В настоящее время создаются проекты развития природного парка с учетом сохранения плодово-ягодных посадок как коллекционных участков и использования рекреационного потенциала территории. Зеленый фонд природного парка г. Хабаровска претерпел значительные изменения, что требует контроля его состояния при эксплуатации ландшафтного и историко-культурного городского объекта.

Цель исследования – изучение состояния растительного покрова природного парка «Питомник им. Лукашова», анализ изменений жизненного состояния древостоев в постагрогенный период для разработки эффективных мероприятий по снижению антропогенных рисков.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является растительный покров ООПТ краевого значения – природного парка «Питомник им. Лукашова», который входил в аграрный комплекс г. Хабаровска и остановил свою хозяйственную деятельность в начале 2000-х гг. Очистку садов от древесной поросли и сухостоя не проводили с 1990-х гг. Природный парк находится в Железнодорожном районе г. Хабаровска в плотном окружении городской застройки и транспортной инфраструктуры.

Изучение состояния растительности ООПТ на площади 163,943 га, из которых 153,785 га занимают насаждения, выполнено в соответствии с методикой инвентаризации городских насаждений [14, 15] с учетом «Правил создания, охраны и содержания зеленых насаждений в городах Российской Федерации», утвержденных приказом Госстроя Российской Федерации от 15.12.1999 № 153 в 2021 и 2024 гг. Состояние деревьев определяли по густоте и цвету кроны, ее облиственности (охвоенности); повреждениям листьев (хвои) в результате заболеваний; наличию и усыханию ветвей в кроне; скорости роста; состоянию

коры и луба; присутствию механических повреждений (обдиры, морозобойные трещины); следам вредителей на стволе или ветвях, сокотечению, водяным побегам на стволе и наплывам, обнажению корней; соответствию габитуса растения стандартным характеристикам [15].

Жизнеспособность насаждений устанавливали по коэффициенту относительного жизненного состояния древостоев [3]. Состояние деревьев оценивали по категориям: 1 – здоровое; 2 – ослабленное; 3 – сильно ослабленное; 4 – сухостой (погибшие). Относительное жизненное состояние вычисляли по формуле:

$$Ln = \frac{100N_1 + 70N_2 + 40N_3 + 5N_4}{N},$$

где N_1, N_2, N_3, N_4 – число здоровых, ослабленных (удовлетворительное состояние), сильно ослабленных (неудовлетворительное состояние) и сухих деревьев соответственно, шт.; N – общее число деревьев, шт.

При учете насаждений на лесных участках природного парка использован выборочный метод, представленный в нормативных документах Минприроды РФ (приказ от 01.12.2014 г. № 529 «Об утверждении порядка земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям занятым лесными насаждениями, и формы соответствующего акта»), позволяющий выявлять качественные и количественные характеристики всего лесного или садового участков. Норма охвата садовых и лесных участков составляла не менее 20 % от их площади. Обследовано 15 411 живых деревьев (диаметр ствола более 4 см) и 2442 сухостойных дерева. Диаметр ствола определяли дендрологической вилкой на высоте 1,3 м от корневой шейки. Ствольность деревьев характеризовали по числу стволов в комлевой части. Размер закладываемых пробных площадей варьировал от 10×10 до 20×20 м в зависимости от размера и конфигурации выделов. Названия видов сосудистых растений приведены по сводке «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» [19].

Состояние насаждений оценено с использованием материалов дистанционного зондирования [4, 15, 18]. Деление территории парка на выделы проведено по данным сверхвысокого пространственного разрешения (0,7 м/пикс.) сервиса ArcGIS Imagery. Картирование и описание координат растений выполнено с помощью GNSS-приемника (глобальные навигационные спутниковые системы). Работа с массивами данных была сделана в программе Excel, а также в среде разработки Google colab, язык программирования Python (модульная библиотека Pandas).

Результаты исследования и их обсуждение

Плодопитомник был основан известным дальневосточным садоводом А.М. Лукашовым, который занимался селекцией груш, яблонь, слив, абрикосов, вишни и др. [13]. С 1937 по 1967 гг. в плодово-ягодном питомнике выращено и реализовано более 2640 тыс. привитых саженцев плодовых и около 4140 тыс. саженцев ягодных культур. Этим посадочным материалом в дальневосточном регионе было заложено 4236 га садов и 800 га ягодных плантаций [23]. Основой питомника являлись маточные насаждения на площади свыше 130 га. Питомник им. Лукашова оказал большое влияние на развитие товарного, коллективного и приусадебного садоводства на Дальнем Востоке, а также за его пределами. По материалам всесоюзной переписи плодово-ягодных культур, сорта группы Лу-

кашовка были распространены в Амурской, Новосибирской, Тюменской, Свердловской и других областях, Приморском и Алтайском краях [22].

В Хабаровске природный парк – сохранившийся культурный ландшафт, образованный в результате взаимодействия природы и человека, его социокультурной и хозяйственной деятельности [11]. Городской ландшафтный комплекс в парке отнесен к садово-парковому [8], он характеризуется наличием преимущественно природно-антропогенных (измененных) ландшафтов – 70 % территории, а также условно природных (слабо измененных) – 23,8 %. Для сохранившихся участков природных комплексов свойственно наличие лесных сообществ из спонтанно сформированного вторичного леса и лугово-кустарниковой растительности. Их местоположение в пойменно-припойменной частях определяет максимальное биологическое и ландшафтное разнообразие этих природно-территориальных единиц. Периферию парка занимают антропогенно-техногенные выделы – 6,2 %, включающие здания, дороги, асфальтовое покрытие, пустыри, свалки, участки открытого грунта. Природно-антропогенные ландшафты сформированы заложенными в различные годы садами. Важную эколого-стабилизирующую роль выполняют защитные лесополосы, составляющие 10,2 % от общей площади парка, – искусственные посадки тополя, березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) и березы даурской (*Betula davurica* Pall.) с ильмом низким (*Ulmus pumila* L.) и естественно сформировавшиеся сообщества из ясеня маньчжурского (*Fraxinus mandshurica* Rupr.). На значительных площадях парка (26,5 %) преимущественно в северной и южной частях находятся залежные земли с луговыми и рудеральными сообществами.

С точки зрения устойчивости ландшафтной структуры особая роль принадлежит давно сформированной сети грунтовых дорог (зачастую насыпных) и расположенным между ними и вдоль них защитным лесополосам. Они создают своеобразный антропогенный каркас, способствуя четкому разделению ландшафтных выделов, одновременно являясь основой формирования предполагаемой в дальнейшем инфраструктуры для разного вида рекреации (спортивной, оздоровительной и т. д.).

Большую часть территории занимают слабонаклонные склоновые поверхности (71,8 % от площади парка) западной и северо-западной экспозиций. В северной части природного парка преобладают склоны северо-западной экспозиции (абсолютные высоты 72–60 м над ур. м.). В центральной части ООПТ, условно выделяемой между двумя ручьями, распространены склоны северо-западной и северо-восточной экспозиций с абсолютными высотами 65–85 м над ур. м. Вывороченные участки характерны для нижних, припойменных частей склонов. Они представлены на северо-западной окраине парка луговыми, а на юго-западной – лесными сообществами. Приводораздельные поверхности (5,4 %) характеризуются абсолютными высотами 90–92 м над ур. м. Насаждения груши и абрикоса были заложены здесь в 1965–1970-х гг.

Особая привлекательность, связанная с большим ландшафтным разнообразием, характерна для выделов в пределах днищ и крутых склонов ручьев, балок и временных водотоков. На этих территориях сохранилась естественная растительность с лесными и луговыми пойменными сообществами и примыкающими к ним припойменными лесами (широколиственно-кустарниковые, белоберезово-осиновые).

Наиболее значительная часть ООПТ (93,8 %) занята растительностью, в составе которой преобладают древесно-кустарниковые сообщества (60,7 %), почти в 2 раза меньшую площадь занимают лугово-кустарниковые сообщества – 33,0 %. В природном парке выделено 2 категории растительности: древесно-кустарниковая и лугово-кустарниковая. К 1-й категории в составе парка относятся посадки плодово-ягодных культур, защитные лесополосы, вторичные леса, ко 2-й – бывшие пашни, парники, школки, пустыри с золотарниковыми, вейниково-золотарниковыми, звездчатково-золотарниковыми залежами, травяно-кустарниковая растительность с редким древостоем, рудерализированные лугово-кустарниковые сообщества, естественная пойменная лугово-кустарниковая растительность с осоковыми, вейниково-тростниковыми, спирейно-рябинниковыми, прибрежными разнотравными растительными сообществами (рис. 1, табл. 1).

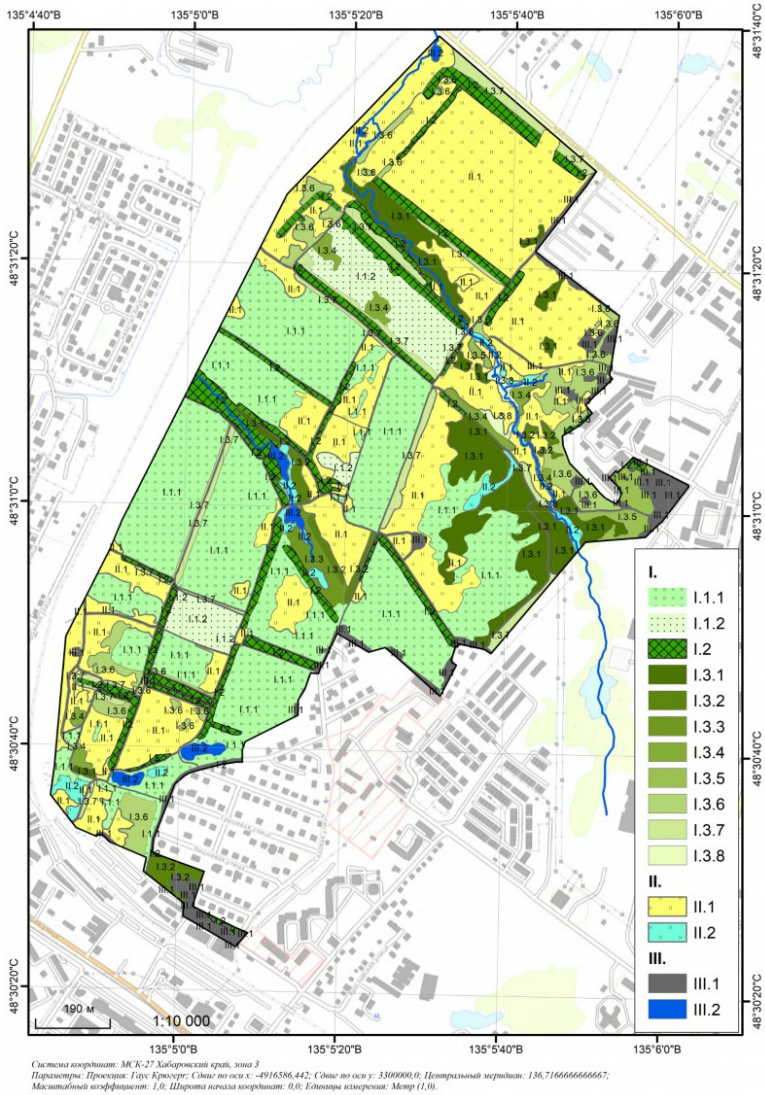


Рис. 1. Карта растительности природного парка «Питомник им. Лукашова». Условные обозначения – см. табл. 1

Fig. 1. Vegetation map of the Lukashov Nursery Nature Park. Legend – see table 1

Таблица 1

Категории растительности природного парка «Питомник им. Лукашова»
и их площадная структура
Vegetation categories of the Lukashov Nursery Nature Park and their area structure

№ п/п	Категория растительности	Площадь	
		га	%
I	Древесно-кустарниковая растительность	99,516	60,70
I.1	<i>Посадки плодово-ягодных культур</i>	59,188	36,10
I.1.1	Посадки груши, остаточные посадки яблони, абрикоса, груши в составе вторичного леса, посадки сливы	52,035	31,74
I.1.2	Посадки кустарников (смородины, малины, крыжовника)	7,154	4,36
I.2	<i>Защитные лесополосы</i>	11,701	7,14
I.2.1	Защитные лесополосы тополевые местами с осиной, бархатом, березой черной, вязом, ясенем	11,701	7,15
I.3	<i>Спонтанно сформировавшиеся вторичные леса</i>	28,626	17,46
I.3.1	Широколиственно-кустарниковые в грушевом саду, белоберезовые, березово-осиновые	10,402	6,35
I.3.2	Ясенево-осиново-березовые	1,230	0,75
I.3.3	Черноберезово-осиново-лиственничные	1,227	0,75
I.3.4	Ивово-березовые	1,738	1,06
I.3.5	Осиновые	1,604	0,98
I.3.6	Ильмово-ивово-березовые, черемухово-ясеневые	6,521	3,97
I.3.7	Полосы естественно сформировавшегося леса вдоль дорог и лесопосадок	5,008	3,05
I.3.8	Ивовые пойменные	0,895	0,55
II	Лугово-кустарниковая растительность	54,269	33,10
II.1.1	Бывшие пашни, парники, школки, пустыри	50,689	30,92
II.1.2	Залежь золотарниковая, вейниково-золотарниковая, звездчатково-золотарниковая, травяно-кустарниковая с редким древостоем, рудерализированные лугово-кустарниковые сообщества	50,689	30,92
II.2.1	Естественная пойменная лугово-кустарниковая растительность	3,580	2,18
II.2.2	Осоковая, вейниково-тростниковая, спирейно-рябиновая, прибрежная разнотравная	3,580	2,19
III	Иные земли	10,158	6,20
III.1	Лишенные растительного покрова	9,023	5,50
III.2	Водные поверхности	1,135	0,69
	<i>Итого</i>	163,943	100

Сохранившиеся с прошлого века посадки плодово-ягодных культур и защитные лесополосы из тополя, вяза, березы и других пород характеризуются высоким видовым разнообразием арборифлоры. За последнее время в их состав вошло большое число видов, свойственных для типичных дубово-широколиственных лесов, которые покрывали эту территорию до начала ее освоения: дуб монгольский *Quercus mongolica* Fisch. Ex Ledeb., маакия амурская *Maackia amurensis* Rupr. Et Maxim., бархат амурский *Phellodendron amurense* Rupr., бересклет малоцветковый *Euonymus pauciflora* Maxim., бересклет Маака *Euonymus maackii* Rupr. и др.

По берегам ручьев и искусственных водоемов распространены вторичные растительные лесные сообщества. Чистые насаждения образуют только береза плосколистная, осина (*Populus tremula* L.) и молодой подрост ясеня маньчжурского. Большая же часть вторичных лесов представлена смешанными сообществами. В составе древостоев преобладают мелколиственные породы: береза плосколистная, береза даурская, ильм низкий, осина, черемуха обыкновенная (*Padus avium* Mill. s.l.), ивы росистая (*Salix rorida* Laksch), удская (*Salix udensis* Trautv. et Mey.) и козья (*Salix caprea* L.), редко встречаются дуб монгольский, ясень маньчжурский, бархат амурский. Днище и склоны временного водотока в центральной части парка покрывают сплошные заросли лианы – лимонника китайского (*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.). В грушевых посадках, лесополосах и на восточной границе парка произрастают устойчивые локальные популяции редких видов – диоскореи nipпонской (*Dioscorea nipponica* Makino) и липариса японского (*Liparis japonica* (Mig.) Maxim.), занесенных в Красные книги [9, 10].

Залежи занимают 30,9 % территории парка, на них доминирует золотарник канадский (*Solidago canadensis* L.). В зависимости от стадии сукцессии и экологических условий биотопа его содоминантами выступают вейник наземный (*Calamagrostis neglecta* (Ehrh.) Gaertn., Mey. Et Scherb), вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin.) или бахромчатолепестник лучистый (*Fimbripetalum radians* (L.) Ikonn.). В составе сообществ появился редкий древостой из ивы козьей и ильма низкого, в кустарниковом ярусе преобладает спирея иволистная (*Spiraea salicifolia* L.).

В юго-западной части парка распространены рудерализованные лугово-кустарниковые сообщества, в составе которых присутствуют клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), подорожник азиатский (*Plantago asiatica* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea asiatica* Serg.).

Естественная пойменная лугово-кустарниковая растительность занимает незначительную площадь и образована зарослями осоки вздутоносой (*Carex rhynchophysa* С.А. Mey.) и осоки придатковой (*Carex appendiculata* (Trautv. et С.А. Mey.) Kuk) в пойме безымянного притока р. Правая Березовая, тростниковыми зарослями в юго-западной и северо-восточной частях парка, где в период интенсивных ливневых осадков происходит временное подтопление. На лугах появились разновозрастные древесно-кустарниковые группировки с доминированием ив, берез, осин и ильма. По берегам искусственных прудов при колебании уровня воды произрастают заросли гидрофильных и мезо-гигрофильных растений с участием рудеральных видов: недотрога железконосная (*Impatiens glandulifera* Royle), частуха восточная (*Alisma orientale* (Sam.) Juz.), хмель японский (*Humulus japonicus* Sieb. et Zucc.) и др. По ложбине стока в верховьях безымянного притока р. Правая Березовая сформировались заросли из спиреи иволистной, рябинника рябинолистного (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br.) и высокотравья – лабазник дланевидный (*Filipendula palmata* (Pall.) Maxim.), василисник скрученный (*Thalictrum contortum* L.), осоки и др.

Анализ особенностей дестабилизации растительности в пределах ООПТ краевого значения свидетельствует о большем влиянии антропогенных факторов в сравнении с природными. Такая ситуация обусловлена расположением охраняемой природной территории в центре г. Хабаровска, ее «зажатостью» со всех сторон транспортной инфраструктурой и жилыми микрорайонами. К фак-

торам дестабилизации растительности относятся отсутствие ухода, поражение стволовыми вредителями, неконтролируемая рекреационная нагрузка, рубки, вандализм. В парке отмечены очаги локальных травяных палов, следы кострищ, свалки бытового и строительного мусора, самозахват земельных участков под огороды и автопарковки.

Прекращение хозяйственной деятельности привело к деградации садов и, как следствие, значительному изменению структуры земель за прошедший период. При общем уменьшении территории питомника за 30-летний период с 229,2 до 163,94 га, произошло сокращение площади садов с 82,6 до 50,962 га, плантаций кустарников с 23,0 до 7,153 га.

В то же время наблюдается увеличение в 1,6 раза площади вторичных лесов с 26,0 до 41,4 га. На заброшенных пустырях, пашнях идет процесс олуговения, отмечается деградация растительного покрова, адвентизация и рудерализация флоры [2]. Появились антропогенные пустыри и свалки, грунтовые дороги, асфальтовое покрытие и открытый грунт. С 1997 по 2021 гг. площадь ООПТ сократилась с 167,9 до 163,9 га [16, 17].

В последние годы идет активный процесс лесовосстановления в лесополосах и остаточных насаждениях грушевых, яблоневых и абрикосовых посадок, что характерно для постагрогенных территорий [1, 21]. В садах природного парка было обследовано 3659 деревьев. Максимальное число здоровых деревьев зарегистрировано в остаточных посадках груши в составе вторичных лесов – 56,48 %. Такая ситуация сложилась за счет высокого участия лесных молодых растений, возраст которых не превышает 30–35 лет. Доля здоровых растений в грушевых садах составляет 34,78 %, ослабленных – 15,81 %, сильно ослабленных – 33,56 % от общего числа деревьев. В посадках абрикоса и сливы здоровых растений лишь 35,67 %, здесь распространилась дикая поросль, доля сухостоя превышает 23 %. Благоприятная ситуация складывается в яблоневых садах – здоровых и удовлетворительного состояния растений 73,22 %, сухостоя – 5,96 % (рис. 2).

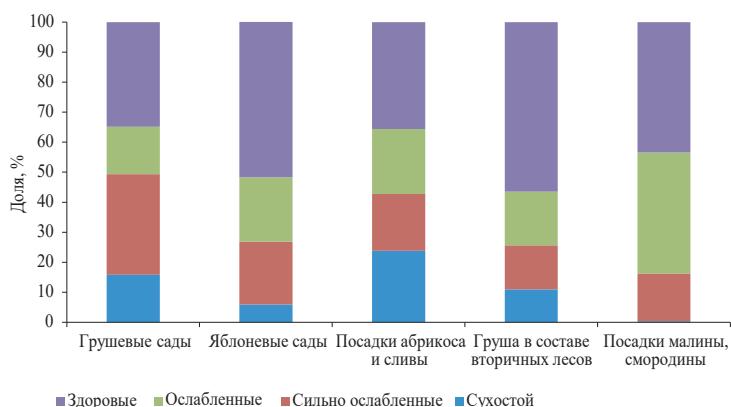


Рис. 2. Виталитетные спектры древесных насаждений в садах природного парка «Питомник им. Лукашова»

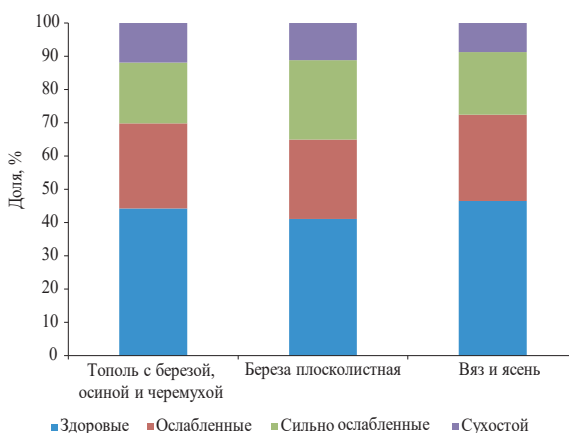
Fig. 2. Vitality spectra of tree plantations in the orchards of the Lukashov Nursery Nature Park

Посадки кустарников занимают 7,154 га (4,36 % от общей площади парка). Фрагментарно сохранились посадки малины, смородины и крыжовника. Кустарниковые плантации зарастают черемухой обыкновенной, яблоней

ягодной (*Malus baccata* (L.) Borkh.), ильмом низким, кленом приречным (*Acer ginnala* Maxim.). Молодые деревья этих видов относятся к категории здоровые (без видимых признаков ослабления) – 43,5 %, доля растений удовлетворительного жизненного состояния достигает 40,28 %. Активно разрастается клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), его участие в составе древесных биогрупп приближается к 9,0 %.

Общая площадь лесозащитных насаждений из тополя и сопутствующих пород (березы, яблони, черемухи, осины) в парке равняется 11,701 га. Лесозащитные полосы закладывали одновременно с садами с учетом направления доминирующих зимних ветров. Их формировали из 2-рядной линии 10–12-летних саженцев тополей и 2–3-рядных посадок берез. В древостой естественным путем встраивались ильм низкий, ясень маньчжурский, осина и береза даурская. При создании лесозащитных полос высаживали растения, не имеющие общих вредителей с фруктовыми деревьями. Сохраняют свое доминирование в настоящее время яблоня ягодная, березы плосколистная и даурская, ясень маньчжурский, появляются липа амурская (*Tilia amurensis* Rupr.), маакия амурская. За счет их участия в древостое повышается число здоровых деревьев – их доля варьирует от 41,1 до 46,5 %. Возобновление тополей под пологом их древостоев отсутствует. Совокупная доля ослабленных и сильно ослабленных деревьев в лесополосах в среднем составляет 45,5 % (рис. 3).

Рис. 3. Виталитетные спектры древесных насаждений в разных по составу лесозащитных полосах природного парка «Питомник им. Лукашова»
Fig. 3. Vitality spectra of tree plantations in forest shelterbelts of varying composition in the Lukashov Nursery Nature Park



Видовая структура древесных насаждений лесозащитных полос включает 37 древесных видов растений и 33 вида кустарников. В отсутствие систематического ухода в подлеске массово появляются березы, черемуха и дубы. В более увлажненных местах в лесополосы встраивается осина. Начинает активно внедряться клен ясенелистный. В древостое появились лесные виды – бархат амурский, ясень маньчжурский, орех маньчжурский (*Juglans mandshurica* Maxim.), в подлеске отмечается возобновление многочисленных семенных всходов яблони. Таксационная формула варьирует от 8Б_{плл}2Т до включения разных пород в лесозащитные полосы – 7Т2Чер1Б_{плл}, 7Чер2Т1Б_{плл}.

Формирование кустарникового яруса определяется условиями увлажнения, заносом диаспор, остаточными посадками в лесозащитных полосах. Кустарниковый полог хорошо сформирован, отличается большим разнообразием и включает 17 видов: вишню войлочную (*Prunus tomentosa* Thunb.), лещину разнолистную (*Corylus heterophylla* Fisch. Ex Trautv.), бересклет священный

(*Euonymus sacrosancta* Koidsz.), шиповник иглистый (*Rosa acicularis* Lindl.) и шиповник даурский (*Rosa davurica* Pall.), рябинник рябинолистный, жимолость золотистоцветковую (*Lonicera chrysantha* Turcz. ex Ledeb.) и съедобную (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn), боярышник Максимовича (*Crataegus maximowiczii* C.K. Schneid.) и боярышник перистонадрезанный (*Crataegus pinnatifida* Bunge), свободнаягодник сидячецветковый (*Eleutherococcus sessiliflorus* (Rupr. et Maxim.) S. Y. Hu), карагану древовидную (*Caragana arborescens* Lam.), бузину кистистую (*Sambucus racemosa* L.), калину Саржента (*Viburnum sargentii* Koehne), леспедецу двуцветную (*Lespedeza bicolor* Turcz.), спирею березолистную (*Spiraea betulifolia* Pall.) и др.

В природном парке по сравнению с 1993 г. увеличилась площадь вторичных лесов с высоким разнообразием арборифлоры. Максимальное число видов отмечено в широколиственно-кустарниковых вторичных лесах с березой и осиной, здесь зарегистрировано 49 видов растений, доля березы плосколистной составляет 23,75 %, черемухи обыкновенной – 10,64 %, клена приречного – 9,36 %, дуба монгольского – 6,17 %. Во вторичных лесах распространен клен ясенелистный (9,4 %). В естественно сформировавшихся лесах вдоль дорог и лесопосадок учтено 46 видов, среди которых 28 – деревья. Во вторичных пойменных ивовых лесах произрастает 22 вида. Доля растений без признаков ослабления во вторичных лесах равняется 49,2 %, при этом соотношение категорий удовлетворительного (19,8 %), неудовлетворительного (16,8 %) и сухостойного (14,2 %) состояний примерно одинаковое (табл. 2).

Таблица 2

**Оценка жизненного состояния деревьев во вторичных лесах природного парка
«Питомник им. Лукашова»**

**Assessment of the vital state of trees in the secondary forests of the Lukashov Nursery
Nature Park**

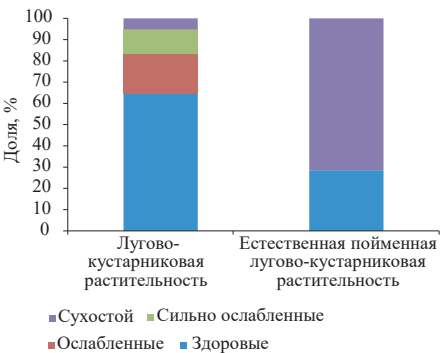
Категория лесов	Здоровое	Ослабленное	Сильно ослабленное	Сухостойное
Широколиственно-кустарниковые вторичные леса с березой и осиной	45,49	18,12	19,48	16,91
Вторичные ясенево-осиново-березовые	30,03	16,64	34,40	18,93
Черноберезово-осиново-лиственничные вторичные	57,79	22,61	10,55	9,05
Ивово-березовые вторичные	56,21	22,42	10,90	10,47
Вторичные осиновые	64,92	18,67	7,33	9,08
Смешанные ильмово-ивово-березовые и черемухо-ясеневые вторичные	66,19	9,19	10,34	14,28
Естественно сформировавшиеся леса вдоль дорог и лесопосадок	43,19	22,93	15,87	18,01
Вторичные пойменные ивовые	29,49	27,88	25,47	17,16

Луговые сообщества занимают более 1/3 парка и распространены на бывших пашнях, в парниках, школках, на пустырях и в пойме водотоков. На залежах, где сельскохозяйственной деятельностью полностью уничтожен лесной покров, наблюдаются начальные стадии облесения. Здесь произрастают золотарниковые, вейниково-золотарниковые, звездчатково-золотарниковые, травяно-кустарниковые с редким древостоем, а также рудерализованные луго-

во-кустарниковые сообщества. На лугах формируются фитоценозы с преобладанием мелколиственных пород. Луга активно зарастают яблоней ягодной, березой плосколистной, осиною; на увлажненных местообитаниях разрастаются ивы (ивы росистая, Шверина *Salix schwerinii* E. Wolf, козья). На лугах более 64 % деревьев являются здоровыми, растений удовлетворительного состояния – 18,7 %, неудовлетворительного – 11,73 %. Доля сухостоя, среди которого много ивы росистой, незначительна – 5,15 % (рис. 4). Естественная пойменная лугово-кустарниковая растительность представлена осоковыми, вейниково-тростниковыми, спирейно-рябинниковыми и прибрежно-разнотравными ассоциациями, где единично встречаются ивы росистая и козья.

Рис. 4. Виталитетные спектры древесных насаждений на пойменных лугах природного парка «Питомник им. Лукашова»

Fig. 4. Vitality spectra of tree plantations in the floodplain meadows of the Lukashov Nursery Nature Park



Среднее значение относительного жизненного состояния большинства древостоев в природном парке «Питомник им. Лукашова» соответствует ослабленному ($L_n = 69,9$ %) (рис. 5).

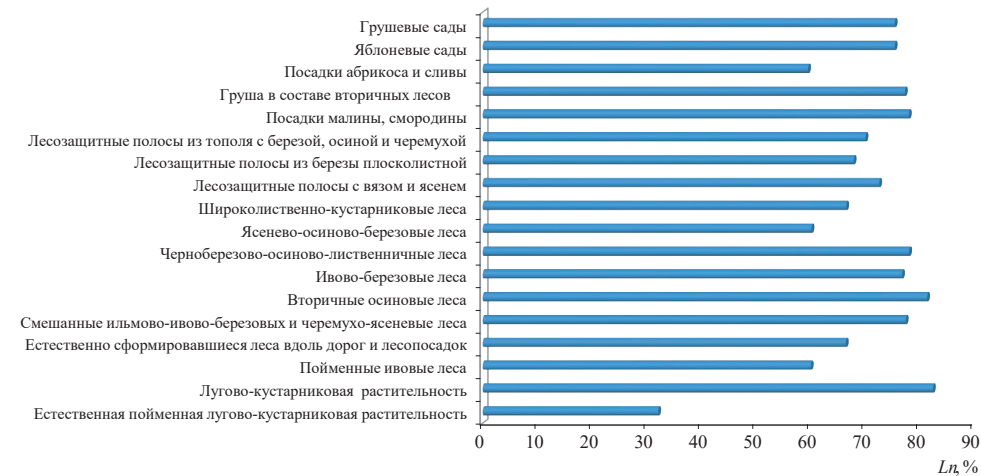


Рис. 5. Изменение коэффициента относительного жизненного состояния древесных насаждений в природном парке «Питомник им. Лукашова»

Fig. 5. Change in the relative vitality index of tree plantations in the Lukashov Nursery Nature Park

Высокая жизнеспособность древостоев характерна для вторичных осиновых лесов ($L_n = 81,39$ %). Древостои плодовых посадок и естественной растительности, относящиеся к категории ослабленные, представлены насаждениями грушевых и яблоневых садов, посадками абрикосов (коэффициент относительного жизненного состояния изменялся от 59,57 до 78,04 %).

Древостой в садах природного парка характеризуется как ослабленный. Здоровых деревьев в среднем 44,7 % от общего числа деревьев, причем в основном за счет внедрившихся лесных видов растений, возраст которых оценивается примерно в 30–35 лет. Одновременно с закладкой фруктовых садов по их периметру формировали лесозащитные полосы, а в центре посадок создавали ветроломные насаждения из берез, ильма и ясеня, которые дали семенной подрост. Видовое разнообразие древесно-кустарниковых растений в садах высокое – 65 видов. Естественное зарастание наблюдается как по периметру садов из лесополос, так и от границы ветроломных лесополос, расположенных в центре садов. Поросль ясеня маньчжурского (3,1 %) возобновляется семенным путем от плодоносящих деревьев из окружающих сады защитных лесополос.

В посадках плодово-ягодных растений, расположенных на слабонаклонных поверхностях преимущественно склонов западной и северо-западной экспозиции, после выпадения сортовых фруктовых деревьев увеличилась доля мелколиственных лесных пород. Разнообразие древесных растений высокое, произрастает 28 видов, среди которых 45,9 % в насаждениях составляют сортовые груши; 11,6 % – яблони; 7,2 % – слива уссурийская (*Prunus ussuriensis* Kov. et Kost.); 1,1 % – абрикос маньчжурский (*Armeniaca mandshurica* (Maxim.) Kostina).

В садах зарегистрировано 37 видов кустарников, среди которых массово произрастают рябинник рябинолистный, бересклет священный, бересклет малоцветковый, вишня войлочная, малина сахалинская (*Rubus sachalinensis* Levl.), свободнаягодник колючий (*Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.) Maxim.), свободнаягодник сидяцветковый и др.

Анализ жизненного состояния древесных насаждений садов в природном парке показывает, что при отсутствии систематического ухода жизнеспособность насаждений фруктовых садов снижается. Участие молодых лесных деревьев (береза, осина, дуб, груша уссурийская, ясень маньчжурский, орех маньчжурский и др.) повышает коэффициент относительного жизненного состояния с 59,57 % (дичающие посадки сливы и абрикоса) до 77,32 % (остаточные насаждения сортовой груши в составе вторичных лесов), что характеризует древостой как ослабленные.

В садах доминирующее положение занимают березы, ясени и черемуха. В результате этого начинают формироваться смешанные сообщества, что видно на примере остаточных насаждений сортовой груши в составе вторичных лесов. В древостой встраиваются черемуха обыкновенная (10,1 % древостоев), разные виды ив (6,3 %), береза плосколистная (5,1 %), возраст которых не превышает 30–35 лет. В садах произрастают эндемичные растения Дальнего Востока – бархат амурский (1,6 % насаждений), маакия амурская (1,2 %), дуб монгольский (0,5 %), черемуха Маака (*Padus maackii* (Rupr.) Kom.) (0,2 %). В структуре древостоя садов повысилось участие ильма низкого – до 4,9 %.

Видовой состав древесных растений на плантациях кустарников включает 11 видов растений, наибольший удельный вес имеют черемуха обыкновенная, яблоня ягодная, береза плосколистная, ясень маньчжурский и др. Без ухода их плантации зарастают древесными видами – ильмом низким, ясенем маньчжурским, кленом приречным и др. Древесный ярус не сформирован, он представлен отдельно стоящими деревьями ивы, клена ясенелистного и др. Отмечены единичные экземпляры благонадежного подроста ильма японского

(*Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg.). На кустарниковых плантациях сформировался ослабленный древостой ($L_n = 78,04\%$).

В лесополосах коэффициент относительного жизненного состояния древостоя варьировал от 67,9 до 72,6 %. В лесополосах произрастает 37 видов древесных растений, здесь образовались чистые древостои березы (16,5 % древостоя) и осины (6,5 %). Они активно зарастают яблонями (18,7 %), черемухой (14,7 %) и представителями широколиственных лесов: орехом маньчжурским – 5,2 %; ясенем маньчжурским – 5,2 %; маакией амурской – 4,4 %; дубом монгольским – 1,9 %; березой даурской – 1,4 %; бархатом амурским – 1,4 %. Древостой определяется как ослабленный с коэффициентом относительного жизненного состояния от 67,92 % в лесозащитных полосах из березы до 72,61 % в лесополосах с вязом и ясенем. В лесозащитных полосах из тополя с березой, осинкой и черемухой этот показатель равен 70,09 %.

Во вторичных лесах сформировались ослабленные древостои, коэффициент относительного жизненного состояния изменялся от 60,0 до 78,0 %, за исключением насаждений в осиновых лесах, которые характеризовались как здоровые ($L_n = 81,39\%$). Среди лугово-кустарниковой растительности редкий древостой считается здоровым ($L_n = 82,46\%$). На пойменных лугах произрастает сильно ослабленный древостой ($L_n = 32,14\%$) из разного вида ив. В целом древостои вторичных лесов ослаблены, исключение – осинники.

На залежах произрастают золотарниковая, вейниково-золотарниковая, звездчатково-золотарниковая, травяно-кустарниковая растительность с редким молодым древостоем, рудерализованные лугово-кустарниковые сообщества. Залежи активно зарастают древесными видами – зарегистрировано 16 видов. Доминируют яблоня ягодная (участие 28,5 %), ивы (19,6 %) и береза плосколистная (17,8 %). Массово появляются груша уссурийская, клен приречный, ясень маньчжурский, осина и др. Среди инвазионных видов отмечена активность ильма низкого (5,7 % от общего числа деревьев) и клена ясенелистного (6,4 %). На залежах коэффициент относительного жизненного состояния древостоя равен 82,46 %, что характеризует его как здоровый. Естественная пойменная лугово-кустарниковая растительность распространена на площади 3,580 га. Здесь произрастают осоковая, вейниково-тростниковая, спирейно-рябинниковая, прибрежная разнотравная растительные ассоциации с редкими ивами (зарастают ивой козьей и ивой росистой). Молодой древостой среди лугово-кустарниковой растительности характеризуется как здоровый ($L_n = 82,46\%$). Среди естественной пойменной лугово-кустарниковой растительности формируются сильно ослабленные редкостойные древостои ($L_n = 32,14\%$), которые испытывают сильное антропогенное воздействие (травяные палы).

Заключение

Общая площадь особо охраняемой природной территории краевого значения природного парка «Питомник им. Лукашова» составляет 163,943 га, на которой растительный покров занимает 153,785 га. Ландшафтный комплекс исследованного объекта относится к садово-парковому и характеризуется наличием природно-антропогенных ландшафтов – 70 % территории, а также условно природных – 23,8 %. По окраинным частям парка размещены антропогенно-техногенные выделы – 6,2 %. Большая часть природного парка (93,8 %)

занята растительностью, в составе которой преобладают древесно-кустарниковые сообщества (60,7 %) и лугово-кустарниковые фитоценозы (33,0 %).

Высокие показатели разнообразия – 68 видов – зарегистрированы в защитных лесополосах, которые являются каналами распространения диаспор растений для их внедрения в насаждения разных категорий. В садах произрастает 65 видов растений. Богатое разнообразие характерно для широколиственно-кустарниковых с березой и осиной вторичных лесов в грушевых садах – 49 видов арборифлоры. В полосах естественно сформировавшегося леса вдоль дорог и лесопосадок – 46 видов и в ясенев-осиново-березовых вторичных лесах – 44 вида. Низким видовым разнообразием отличается естественная пойменная лугово-кустарниковая растительность, здесь произрастает 4 вида древесно-кустарниковых растений.

На постаграрной территории посадки фруктовых растений дичают и деградируют, активизировались процессы лесовосстановления и олуговения заброшенных сельскохозяйственных участков, наблюдается агрессивная инвазия древесных и многолетних травянистых растений. Жизнеспособность древостоя в садах и естественной растительности природного парка снижалась, индекс относительного жизненного состояния изменялся от 59,57 до 78,09 % (ослабленное состояние), за исключением насаждений во вторичных осиновых лесах (81,39 %) и редкого древостоя среди лугово-кустарниковой растительности (82,46 %), индексы которых определяют насаждения как здоровые. Среди естественной пойменной лугово-кустарниковой растительности сформировались сильно ослабленные ивовые редкостойные древостои (32,14 %).

Результаты исследования состояния растительности природного парка «Питомник им. Лукашова» могут служить основой разработки стратегии развития крупнейшей в г. Хабаровске особо охраняемой природной территории для повышения качества жизни жителей города и сохранения уникального природного объекта. Дальнейшее развитие природной территории предполагает сохранение коллекционных участков дальневосточных садов, а также комплексное благоустройство парка для эколого-просветительской, рекреационной и туристической деятельности, ориентирует на использование бюджетных источников финансирования, а также привлечение внебюджетных средств за счет муниципально-частного партнерства. Социальные и экономические эффекты от вложения финансовых средств повысятся при условии активного участия горожан, заинтересованных в реализации адресных оптимизационных мероприятий в пределах городских особо охраняемых природных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агutowa Ж.В. Постаграрная трансформация геосистем Тункинской котловины (Республика Бурятия) // Науч. ведомости Белгородск. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2019. Т. 43, № 3. С. 232–242.

Agutova Zh.V. Post-Agrarian Transformation of Geosystems of the Tunkinskaya Depression (Republic of Buryatia). *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 232–242. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-3-232-242>

2. Алейникова Е.А., Терleckая А.Т. Состояние особо охраняемых природных территорий краевого значения в городе Хабаровске // Проблемы управления зелеными на-

саждениями в Хабаровске: материалы 4-й город. науч.-практ. конф. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2009. С. 37–40.

Aleynikova E.A., Terletskaia A.T. The State of Specially Protected Natural Areas of Regional Significance in the City of Khabarovsk. *Issues of Managing Green Spaces in Khabarovsk: Proceedings of the 4th City Scientific and Practical Conference*. Khabarovsk, PNU Publ., 2009, pp. 37–40. (In Russ.).

3. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Alekseev V.A. Diagnostics of the Vital State of Trees and Forest Stands. *Lesovedenie* = Forest Science, 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.).

4. Артемьев О.С. Методические основы таксации городских насаждений с применением материалов дистанционных съемок: дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 2004. 441 с.

Artemyev O.S. *Basis Procedure for the Urban Greenery Valuation Using Remote Sensing Data*: Dr. Agric. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2004. 441 p. (In Russ.).

5. Гичан Д.В., Тебенькова Д.Н. Заращение земель сельскохозяйственного назначения древесной растительностью: масштабы, причины, пути использования. Обзор // Вопросы лесн. науки. 2023. Т. 6, № 3. С. 1–51.

Gichan D.V., Tebenkova D.N. Woody Plants Growth on Abandoned Agricultural Lands: Scale, Causes of Abandonment, Ways of Use. A Review. *Forest Science Issues*, 2023, vol. 6, no. 3, pp. 1–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202363-131>

6. Дебелая И.Д., Морозова Г.Ю. Анализ структуры сети особо охраняемых природных территорий городских округов на примере Дальневосточного федерального округа // Вестн. Забайкальск. гос. ун-та. 2024. Т. 30, № 1. С. 18–27.

Debelay I.D., Morozova G.Yu. Analysis of the Network' Structure of the Protected Areas of City Districts Using the Example of the Far Eastern Federal District. *Transbaikalian State University Journal*, 2024, vol. 30, no. 1, pp. 18–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.2109/2227-9245-2024-30-1-18-27>

7. Зайцев О.Б., Поляков В.Е. Особо охраняемые природные территории города Екатеринбурга. Екатеринбург: Ажур, 2015. 46 с.

Zaytsev O.B., Polyakov V.E. *Protected Areas of the Yekaterinburg City*. Yekaterinburg, Azhur Publ., 2015. 46 p. (In Russ.).

8. Климина Е.М. Ландшафтно-картографическое обеспечение территориального планирования (на примере Хабаровского края). Владивосток: Дальнаука, 2007. 132 с.

Klimina E.M. *Landscape-Cartographical Maintenance of Territorial Planning (On the Example of Khabarovskij Krai)*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2007. 132 p. (In Russ.).

9. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / отв. ред.: д-р биол. наук Д.В. Гельтман. 2-е офиц. изд. М.: ВНИИ «Экология», 2024. 944 с.

Red Data Book of the Russian Federation. Plants and Fungi. Editor-in-Chief: Doctor of Biology D.V. Geltman. Moscow, VNI Ecologiya Publ., 2024. 944 p. (In Russ.).

10. Красная книга Хабаровского края: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений, грибов и животных: официальное издание / отв. ред.: Б.А. Воронов, М.В. Крюкова, С.Д. Шлотгауэр, В.Т. Тагирова, А.Л. Антонов, А.Н. Куликов, З.В. Ошлакова. Воронеж: Мир, 2019. 604 с.

Red Data Book of Khabarovsk Krai: Rare and Endangered Species of Plants, Fungi and Animals: Official Edition. Ed. by B.A. Voronov, M.V. Kryukova, S.D. Shlotgauer, V.T. Tagirova, A.L. Antonov, A.N. Kulikov, Z.V. Oshlakova. Voronezh, Mir Publ., 2019. 604 p. (In Russ.).

11. Кулешова М.Е. Принципы и методы оценки культурного ландшафта / Культурный ландшафт как объект наследия. М.: Ин-т Наследия; Дм. Буланин, 2004. С. 37–55.

Kuleshova M.E. *Principles and Methods of Cultural Landscape Assessment. Cultural Landscape as a Heritage Object*. Moscow, Heritage Institute, Dm. Bulanin Publ., 2004, pp. 37–55. (In Russ.).

12. Лобанов А.И., Кутькина Н.В., Мартынова М.А., Мулява В.Е., Мулява В.В. Жизнеспособность и лесоводственно-мелиоративная оценка лиственных лесных полос в Койбалской степи Республики Хакасия // Сиб. лесн. журн. 2024. № 2. С. 34–40.

Lobanov A.I., Kut'kina N.V., Martynova M.A., Mulyava V.E., Mulyava V.V. Viability and Silvicultural-Reclamation Assessment of Deciduous Forest Belts in the Koibal Steppe of the Republic of Khakassia. *Siberian Journal of Forest Science*, 2024, no. 2, pp. 34–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20240204>

13. Лукашев А.М. Мой опыт. Хабаровск: Дальн. краевое гос. изд-во, 1936. 83 с.

Lukashev A.M. *My Experience*. Khabarovsk, Far East Regional State Publishing House, 1936. 83 p. (In Russ.).

14. Маслов А., Гульбе А., Гульбе Я., Медведева М., Сирин А. Оценка ситуации с зарастанием сельскохозяйственных земель лесной растительностью на примере Угличского района Ярославской области // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4. С. 6–14.

Maslov A., Gulbe A., Gulbe Ya., Medvedeva M., Sirin A. An Assessment of the Overgrowth of Agricultural Land with Forest Vegetation: Case Study of the Uglich District in the Yaroslavl Region. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2016, no. 4, pp. 6–14. (In Russ.).

15. Методика инвентаризации городских зеленых насаждений. М.: Минстрой России. Акад. коммунального хоз-ва им. К.Д. Памфилова, 1997. 14 с.

Methodology for the Inventory of Urban Green Spaces. Moscow, Ministry of Construction of Russia. K.D. Pamfilov Academy of Municipal Services Publ., 1997. 14 p. (In Russ.).

16. Морозова Г.Ю., Дебелая И.Д., Дубянская И.Г. Особо охраняемые природные территории города Хабаровска. Хабаровск: Хабаровск вести, 2021. 168 с.

Morozova G.Yu., Debelaya I.D., Dubyanskaya I.G. *Protected Areas of Khabarovsk*. Khabarovsk, Khabarovskie vesti Publ., 2021. 168 p. (In Russ.).

17. Нечаев А.А., Морин В.А., Грек В.С. Особо охраняемые природные территории Хабаровска: тенденции изменений за десятилетие // Роль зеленых насаждений в стратегии развития Хабаровска: материалы 3-й город. науч.-практ. конф. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2007. С. 22–25.

Nechaev A.A., Morin V.A., Grek V.S. Specially Protected Natural Areas of Khabarovsk: Trends over the Past Decade. *The Role of Green Spaces in the Khabarovsk's Development Strategy: Proceedings of the 3rd City Scientific and Practical Conference*. Khabarovsk, PSU Publ., 2007, pp. 22–25. (In Russ.).

18. Остроухов А.В., Клевцов Д.Р. Информативность вегетационных индексов для оценки послерубочного восстановления темнохвойных лесов Северного Сихотэ-Алиня по данным со спутников серии Landsat // Соврем. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 5. С. 194–204.

Ostroukhov A.V., Klevtsov D.R. Informativeness of Vegetation Indices in Assessing Post-Cutting Restoration of Dark Coniferous Forests in Northern Sikhote-Alin According to Data from Landsat Series Satellites. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2023, vol. 20, no. 5, pp. 194–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-194-204>

19. Сосудистые растения советского Дальнего Востока / под ред. С.С. Харкевича. Т. 1–8. Л.(СПб.): Наука, 1985–1996.

Vascular Plants of the Soviet Far East. Ed. by S.S. Kharkevich. Vol. 1–8. Leningrad, Nauka Publ., 1985–1996. (In Russ.).

20. Стадолин М.Е., Ямчук Е.В. Особо охраняемые природные территории местного значения: проблемы управления и развития // Вестн. ун-та. 2017. № 3. С. 195–199.

Stadolin M.E., Yamchuk E.V. Specially Protected Natural Areas of Local Significance: Problems of Governance and Development. *Vestnik Universiteta*, 2017, no. 3, pp. 195–199. (In Russ.).

21. Телеснина В.М. Динамика растительного покрова в ходе демулационной сукцессии в подзоне южной тайги (Костромская область) после разных видов сельскохозяйственного использования // Вестн. Удмуртск. ун-та. Биология. Науки о Земле. 2016. Т. 26, № 3. С. 26–39.

Telesnina V.M. Dynamics of Vegetation Cover During Restoration Succession in South Taiga Subzone (Kostroma Region) after Different Types of Agricultural Usage. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 2016, vol. 26, no. 3, pp. 26–39. (In Russ.).

22. Тимошин С.И. Плодово-ягодный питомник и сад в Хабаровском крае. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 1961. 152 с.

Timoshin S.I. *Fruit and Berry Nursery and Orchard in Khabarovsk Krai*. Khabarovsk, Khabarovsk Book Publishing House, 1961. 152 p. (In Russ.).

23. Тимошин С.И. Плодово-ягодный сад в Хабаровском крае. Хабаровск: Хабаровск. кн. изд-во, 1968. 248 с.

Timoshin S.I. *Fruit and Berry Orchard in Khabarovsk Krai*. Khabarovsk, Khabarovsk Book Publishing House, 1968. 248 p. (In Russ.).

24. Ghafari S., Kaviani B., Sedaghatthoor Sh., Allahyari M.S. Ecological Potentials of Trees, Shrubs and Hedge Species for Urban Green Spaces by Multi Criteria Decision Making. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, vol. 55, art. 126824.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126824>

25. Gunnarsson B., Knez I., Hedblom M., Ode Sang Å. Effects of Biodiversity and Environment-Related Attitude on Perception of Urban Green Space. *Urban Ecosystems*, 2016, vol. 20, pp. 37–49. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0581-x>

26. Hernandez J.G.V., Pallagst K., Hammer P. Urban Green Spaces as a Component of an Ecosystem Functions, Services, Users, Community Involvement, Initiatives and Actions. *International Journal Environmental Sciences & Natural Resources*, 2018, vol. 8, iss. 1, art. 555730. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.08.555730>

27. Kinzig A.P., Warren P., Martin C., Hope D., Katti M. The Effects of Human Socioeconomic Status and Cultural Characteristics on Urban Patterns of Biodiversity. *Ecology & Society*, 2005, vol. 10, no. 1, art. 23. <https://doi.org/10.5751/ES-01264-100123>

28. McKinney M.L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation: The Impacts of Urbanization on Native Species are Poorly Studied, but Educating a Highly Urbanized Human Population about These Impacts Can Greatly Improve Species Conservation in All Ecosystems. *BioScience*, 2002, vol. 52, iss. 10, pp. 883–890.

[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)

29. Sjöman H., Hirons A.D., Bassuk N.L. Urban Forest Resilience Through Tree Selection – Variation in Drought Tolerance in *Acer*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, vol. 14, iss. 4, pp. 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.004>

30. Trzyna T. Urban Protected Areas – Profiles and Best Practice Guidelines. *Best Practice Protected Area Guidelines Series*. No. 22. Gland, Switzerland, IUCN, 2014. 110 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Научная статья

УДК 582.475.2:631.524.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-96-109

Изменчивость фотосинтетического пигментного комплекса ели с разной формой семенных чешуй в северной подзоне тайги Архангельской области

С.Н. Тарханов[✉], д-р биол. наук, зав. лаб., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Е.А. Пинаевская, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

Ю.Е. Аганина, канд. биол. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

А.С. Пахов, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [HRB-3337-2023](https://orcid.org/0000-0002-2362-8840),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-8840>

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, г. Архангельск, Россия; tarkse@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru, aleksander.pakhoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.04.25 / Одобрена после рецензирования 18.06.25 / Принята к печати 21.06.25

Аннотация. Территория Архангельской области входит в зону интрогрессивной гибридизации ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) на Русской равнине. Форма семенных чешуй у многих видов семейства Pinaceae содержит большой объем генетической информации, свойственной как виду, так и его формам. Целью исследования стало выявление особенностей сезонной динамики показателей фотосинтетического пигментного комплекса у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской в северной тайге Архангельской области. Научные работы проводили в ельниках черничного типа на слабоподзолистых суглинистых почвах на моренных суглинках, типичных для северной тайги вблизи устья р. Северной Двины (64°30' с. ш. 41°00' в. д.). На постоянных пробных площадях промаркировали 10 деревьев ели сибирской и 10 деревьев ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской, выделенных по форме семенных чешуй. В 2023 г. у них отбирали образцы 1-летней «теневой» хвои из нижней части кроны в разные календарные периоды. Спектрофотометрическим методом определяли содержание в хвое хлорофиллов и каротиноидов, а также рассчитывали долю хлорофиллов в светособирающем комплексе. В результате у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской выявлено сходство в динамике относительных показателей фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвои. Вместе с тем показано, что в летний и осенний сезоны вплоть до завершения вегетации и при подготовке к перезимовке у исследованных елей происходит накопление зеленых пигментов, причем более активно – у гибридной формы. При этом защитная роль каротиноидов возрастает. Диапазон изменений доли хлорофиллов в светособирающем комплексе ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской с мая по ноябрь в среднем по месяцам составляет 55–62 %, что обусловлено адаптацией их фотосинтетического аппарата к экологическим условиям высоких широт.



Ключевые слова: ель, форма семенных чешуй, ель сибирская, *Picea obovata* Ledeb., ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской, хлорофилл, каротиноиды, Архангельская область, северная тайга, фотосинтетический пигментный комплекс, сезонная динамика показателей пигментного комплекса

Финансирование: Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦКИА УрО РАН «Исследование устойчивости лесных экосистем на приарктических территориях Европейского Севера России» (проект FUUW-2025-0003, регистрационный номер – 125021902596-8).

Для цитирования: Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е., Пахов А.С. Изменчивость фотосинтетического пигментного комплекса ели с разной формой семенных чешуй в северной подзоне тайги Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 96–109. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-96-109>

Original article

Variability of the Photosynthetic Pigment Complex in Spruce Trees with Different Seed Scale Shapes in the Northern Taiga of the Arkhangelsk Region

Sergei N. Tarkhanov[✉], Doctor of Biology, Chief of Laboratory, Chief Research Scientist; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

Ekaterina A. Pinaevskaya, Candidate of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

Yuliya E. Aganina, Candidate of Biology, Research Scientist; ResearcherID: [ABB-6305-2020](https://orcid.org/0000-0002-6069-8979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

Aleksandr S. Pakhov, Junior Research Scientist; ResearcherID: [HRB-3337-2023](https://orcid.org/0000-0002-2362-8840), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-8840>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia; tarkse@yandex.ru[✉], aviatorov8@mail.ru, julja-a30@rambler.ru, aleksander.pakhoff@yandex.ru

Received on April 3, 2025 / Approved after reviewing on June 18, 2025 / Accepted on June 21, 2025

Abstract. Terrain of the Arkhangelsk region is part of the introgressive hybridization zone of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) and European spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) on the East European Plain. In many species of the Pinaceae family, the shape of the seed scales contains a wealth of genetic information specific to both the species and its varieties. The research aimed at determining the seasonal dynamics of the photosynthetic pigment complex in Siberian spruce and hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits in the northern taiga of the Arkhangelsk Region. The field studies were carried out in blueberry spruce forests on low-podzolic loamy soils overlying morainic loams, typical in the northern taiga near the mouth of the Northern Dvina River (64°30' N, 41°00' E). We have labelled 10 Siberian spruce trees and 10 hybrid spruce trees with a predominance of Siberian spruce traits, determined by the seed scale shape at the permanent trial plots. Samples of annual (shadow) needles were harvested from the lower part of the crown at various times of the year in 2023. Spectroscopic methods allowed us to determine the chlorophyll and carotenoid content in

pine needles and to calculate the proportion of chlorophylls in the light-harvesting complex. The results revealed similarities in the dynamics of relative parameters of the photosynthetic pigment complex in annual needles of Siberian spruce and hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits. Meanwhile, the research shows that during the summer and fall seasons, right up until the end of the growing season and as they prepare for winter dormancy, the spruce trees studied accumulate green pigments, with the hybrid form exhibiting this process more actively. This increases the protective role of carotenoids. The range of variation in the proportion of chlorophylls in the light-harvesting complex of Siberian spruce and hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits from May to November averages 55–62 % per month, which is due to the adaptation of their photosynthetic apparatus to the ecological conditions of high latitudes.

Keywords: spruce, seed scale shape, Siberian spruce, *Picea obovata* Ledeb., hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits, chlorophyll, carotenoids, Arkhangelsk region, northern taiga, photosynthetic pigment complex, seasonal dynamics of pigment complex parameters

Funding: The research was carried out as part of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences titled “Study of the Forest Ecosystems Resilience in Subarctic Regions of the Russian European North” (Project FUUW-2025-0003, Registration No. 125021902596-8).

For citation: Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E., Pakhov A.S. Variability of the Photosynthetic Pigment Complex in Spruce Trees with Different Seed Scale Shapes in the Northern Taiga of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 96–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-96-109>

Введение

Территория Архангельской области входит в зону интрогрессивной гибридизации ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и ели сибирской (*P. obovata* Ledeb.), которая занимает широкую полосу Русской равнины – от Уральских гор до Среднерусской возвышенности [8, 9, 11, 12, 29]. Гибридные формы были описаны ранее – *P. fennica* Regel (Ком.), *P. uralensis* Terl., *P. medioxima* Nyl., *P. uwarowii* Kaufm [13]. Они объединены под общим названием – ель финская (*P. fennica* Regel).

Форма семенных чешуй у многих видов семейства Pinaceae содержит большой объем генетической информации, характерной как для вида, так и для его форм, и является надежным критерием определения таксономического положения растения. В северной тайге Архангельской области наиболее распространены ель сибирская и ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской, различающиеся по типу семенных чешуй. В северной тайге вблизи устья р. Северной Двины их встречаемость примерно одинакова [19]. Это соответствует ранее приведенным данным П.П. Попова [10] и И.Ю. Коропачинского с соавт. [5].

Изменение содержаний хлорофиллов и каротиноидов, а следовательно, и их соотношений, является показателем основного метаболизма растений и может служить критерием устойчивости вида к условиям среды [2, 18, 27]. Пигментный состав хвои ели в значительной степени определяется наследственными факторами [1]. Сравнительная оценка сезонной динамики фотосинтетических пигментных комплексов ели сибирской и ели гибридной с преоб-

ладанием признаков ели сибирской в северной тайге Архангельской области ранее не проводилась.

Цель работы – выявление особенностей сезонной динамики показателей фотосинтетического пигментного комплекса ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской в северной тайге Архангельской области.

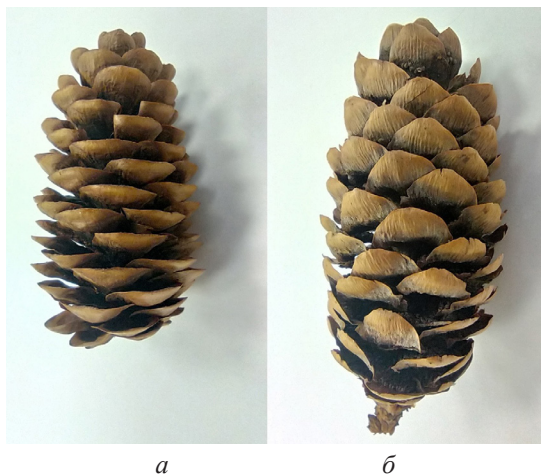
Объекты и методы исследования

Исследование было проведено в ельниках черничного типа на слабо-подзолистых суглинистых почвах на моренных суглинках, типичных для северной тайги вблизи устья р. Северной Двины (64°30' с. ш. 41°00' в. д.). Эти почвы характеризуются сильной кислотностью верхних горизонтов, степень насыщенности основаниями в верхних минеральных горизонтах составляет 7–17 %, в других – 28–57 %. В перегнойно-аккумулятивном горизонте содержание гумуса составляет от 3,5 до 7,5 %, азота – от 0,08 до 0,26 %, подвижных фосфора и калия – относительно низкое [17]. Биологически активная температура (более 10 °С) подзолистых почв в северотаежных ельниках наблюдается в течение очень короткого периода и только в лесной подстилке. В 20-сантиметровом слое почва не прогревается. Водный режим относительно благоприятный. Влажность почвы в течение всего вегетационного периода близка или равна наименьшей влагоемкости, но может повышаться в весенний и осенний периоды, когда становится выше наименьшего показателя из-за таяния снега и повышенного количества осадков [4].

На постоянных пробных площадях, заложенных стандартными методами (ГОСТ 16128–70. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки) в ельнике черничном, проводили в 2023 г. маркировку 10 деревьев ели сибирской и 10 деревьев ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской, выделенных по типу семенных чешуй, согласно Л.Ф. Правдину [13] (рис. 1). Состав древостоя – 8Е1Б10С+С. Древостой ели – разновозрастный, средний возраст: 150 лет (1-е поколение) и 80 лет (2-е поколение). Средняя высота соответственно составляет 20 и 14 м, диаметр ствола на высоте 1,3 м – 22 и 13 см. Класс бонитета – IV. Сомкнутость крон древостоя – 0,6. Подрост представлен в основном елью – 3 тыс. шт./га в удовлетворительном состоянии, реже – березой и осинкой. В подлеске встречаются рябина, шиповник, можжевельник, редко – малина.

Рис. 1. Формы семенных чешуй:
а – ель сибирская; б – ель гибридная
с преобладанием признаков ели
сибирской

Fig. 1. Seed scale shapes: a – Siberian
spruce; б – hybrid spruce with
a predominance
of Siberian spruce traits



а

б

Травяно-кустарничковый ярус с общим проективным покрытием 0,5–0,7 представлен черникой, брусникой, седмичником, кислицей обыкновенной, майником двулистным, ожикой волосистой, грушанкой круглолистной, костяникой, плаунами, а в «окнах» – вейником наземным, геранью лесной, чиной весенней. В мохово-лишайниковом ярусе с общим проективным покрытием 0,8–0,9 господствуют зеленые мхи, в понижениях фрагментарно присутствуют кукушкин лен и сфагнумы.

Образцы 1-летней хвои у исследованных деревьев отбирали до начала роста побегов (май), в период активного роста (июль), его завершения (август), окончания вегетации (сентябрь–октябрь) и перед перезимовкой (ноябрь). В лабораторных условиях спектрофотометрическим методом определяли содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в хвое [14]. Долю хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) рассчитывали по формуле [16].

Результаты исследования и их обсуждение

Изменение содержания хлорофиллов и каротиноидов, а следовательно, и их соотношений, является показателем основного метаболизма растений и может служить критерием устойчивости вида к условиям среды [2, 18, 27]. Результатом новообразования пигментов выступает развитие адаптивных реакций у растений [3, 20–22, 26, 31]. Между елью сибирской и близкой к ней гибридной формой нами выявлены существенные различия содержания хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов в 1-летней хвое в период окончания вегетации (сентябрь) и содержания хлорофиллов *a* и *b* перед перезимовкой (ноябрь). Эти показатели значимо выше у гибридной ели по сравнению с елью сибирской (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Достоверность различий показателей фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвои ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской ($t_{0,05} = 2,26$)

Reliability of difference in parameters of the photosynthetic pigment complex in annual needles between Siberian spruce and hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits ($t_{0,05} = 2.26$)

Декада месяца	X_a	X_b	X_{a+b}	К	$X_{a+b} + К$	X_a / X_b	$X_{a+b} / К$	ССК
III.05	0,21	0,16	0,20	0,05	0,18	0,14	0,24	0,14
I.07	0,07	0,04	0,04	0,54	0,12	0,05	1,86	0,04
I.08	0,79	0,86	0,81	0,76	0,80	0,57	0,12	0,59
I.09	2,93	2,71	2,93	2,67	2,90	0,19	1,46	0,17
I.10	1,87	1,83	1,90	1,71	1,88	1,13	1,38	1,10
I.11	2,38	2,68	2,48	2,13	2,43	1,40	1,96	1,35

Примечание: $t_{0,05}$ – t-критерий на 5%-м уровне значимости; ССК – доля хлорофиллов светособирающего комплекса.

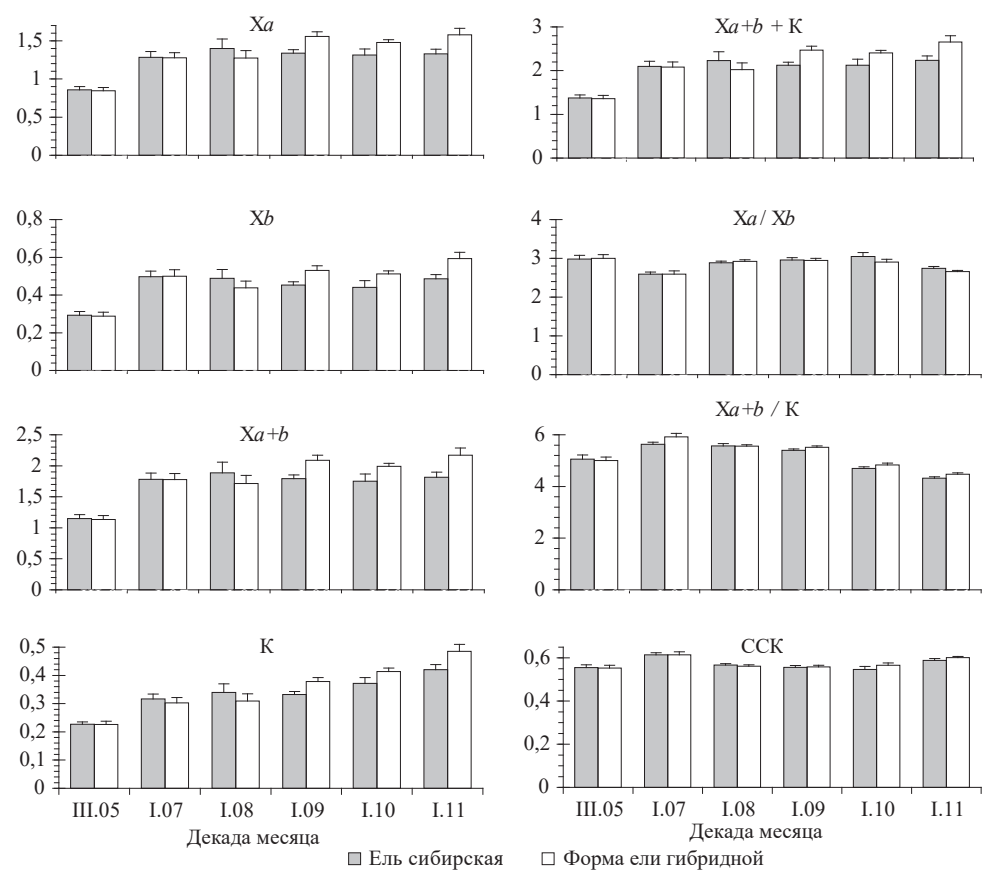


Рис. 2. Сезонная динамика показателей (среднее значение с ошибкой) фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвои ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской: Xa , Xb , K – содержание хлорофиллов a и b и каротиноидов соответственно, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ сухой массы

Fig. 2. Seasonal trends in parameters (mean values with standard error) of the photosynthetic pigment complex in annual needles of Siberian spruce and hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits: Xa , Xb , K – content of chlorophylls a , b and carotenoids, respectively, $\text{mg} \times \text{g}^{-1}$ dry weight

Среднемесячная температура воздуха в сентябре 2023 г. была значительно выше среднего многолетнего показателя (табл. 2). По-видимому, образование фотосинтетических пигментов у гибридной формы ели в большей степени связано с повышением температуры по сравнению с елью сибирской.

Таблица 2

Метеорологические показатели по данным метеостанции «Архангельск» Meteorological parameters based on the Arkhangelsk weather station data				
Месяц	Температура воздуха, °С		Сумма осадков, мм	
	среднемесячная (2023 г.)	среднемноголетняя	месячная (2023 г.)	среднемноголетняя
Май	10,5	6,0	20	46
Июнь	12,0	12,4	61	62
Июль	16,8	15,6	100	64
Август	16,2	13,6	34	67

Окончание табл. 2

Месяц	Температура воздуха, °С		Сумма осадков, мм	
	среднемесячная (2023 г.)	среднемноголетняя	месячная (2023 г.)	среднемноголетняя
Сентябрь	13,0	7,9	83	69
Октябрь	1,8	1,5	75	63
Ноябрь	–5,9	–4,1	56	51

При теплой погоде в октябре у гибридной формы ели содержание фотосинтетических пигментов также было больше, чем у ели сибирской, хотя статистически эти различия незначимы. Вероятно, ель гибридная сильнее реагирует на повышение температуры в осенний период.

Наши данные показывают, что ель сибирская и ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской имеют схожий характер сезонной динамики относительных показателей фотосинтетического пигментного комплекса. Ритмика в динамике абсолютных показателей хлорофиллов и каротиноидов у них нарушается в августе–сентябре, поскольку у ели сибирской их содержание в сентябре повышается по сравнению с августом, а у гибридной формы, напротив, понижается. Минимальное содержание хлорофиллов *a* и *b* у них наблюдается в мае (до начала роста побегов). В сезонной динамике содержания каротиноидов в 1-летней хвое у ели сибирской можно отметить тенденцию постепенного повышения с мая по ноябрь. Минимальное содержание каротиноидов у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской наблюдается также в мае и существенно отличается от содержания в другие месяцы (табл. 3).

Таблица 3

Достоверность различия показателей фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвои ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской по сезонам ($t_{0,05} = 2,26$; $q_{s0,05} = 2,26$)
Reliability of difference in parameters of the photosynthetic pigment complex in annual needles between Siberian spruce and hybrid spruce with a predominance of Siberian spruce traits by seasons ($t_{0,05} = 2.26$; $q_{s0,05} = 2.26$)

Сравниваемые периоды (декада месяца)	Показатель	Xa	Xb	Xa+b	K	Xa+b + K	Xa/Xb	Xa+b/K	ССК
<i>Ель сибирская</i>									
III.05–I.07	t	5,03	5,82	5,36	4,64	5,30	3,54	3,21	3,57
	q _s	4,26	4,84	4,50	4,41	4,51	3,14	2,83	3,13
III.05–I.08	t	4,11	3,83	4,05	3,56	3,99	0,93	2,80	0,80
	q _s	3,49	3,63	3,55	3,23	3,51	1,32	3,65	0,95
III.05–I.09	t	7,91	6,19	7,58	8,05	7,75	0,19	1,99	0,08
	q _s	6,60	5,37	6,38	7,26	6,54	0,17	1,94	0,07
III.05–I.10	t	4,99	3,62	4,62	6,43	4,91	0,46	2,05	0,45
	q _s	4,02	2,98	3,75	5,56	4,01	0,38	1,79	0,38
III.05–I.11	t	6,34	6,34	6,46	9,56	7,06	2,25	4,30	2,20
	q _s	5,16	5,13	5,24	8,36	5,78	2,01	3,74	1,96
I.07–I.08	t	0,79	0,16	0,53	0,66	0,55	4,04	0,57	3,94
	q _s	0,74	0,17	0,51	0,67	0,53	3,98	0,47	3,83

Продолжение табл. 3

Сравниваемые периоды (декада месяца)	Показатель	Xa	Xb	Xa+b	K	Xa+b + K	Xa/Xb	Xa+b/K	ССК
I.07–I.09	t	0,63	1,34	0,09	0,78	0,19	4,53	2,43	4,43
	q _s	0,53	1,10	0,07	0,63	0,16	3,58	1,94	3,48
I.07–I.10	t	0,26	1,26	0,19	2,01	0,14	3,91	9,08	4,05
	q _s	0,20	1,00	0,15	1,56	0,11	4,25	10,47	4,48
I.07–I.11	t	0,46	0,33	0,25	4,06	0,87	2,00	13,95	1,99
	q _s	0,37	0,27	0,20	3,35	0,70	2,25	15,46	2,22
I.08–I.09	t	0,45	0,71	0,53	0,23	0,48	1,03	1,67	0,98
	q _s	0,43	0,69	0,50	0,21	0,46	0,90	1,65	0,84
I.08–I.10	t	0,58	0,82	0,65	0,86	0,42	1,45	8,06	1,36
	q _s	0,57	0,79	0,63	0,85	0,41	1,52	7,12	1,44
I.08–I.11	t	0,51	0,06	0,39	2,25	0,03	2,15	12,54	2,15
	q _s	0,46	0,05	0,35	2,19	0,03	1,85	12,29	1,86
I.09–I.10	t	0,28	0,34	0,30	1,67	0,00	0,73	8,04	0,62
	q _s	0,17	0,22	0,19	1,04	0,00	0,80	5,72	0,70
I.09–I.11	t	0,14	1,15	0,21	4,13	0,90	2,88	14,16	2,83
	q _s	0,12	0,94	0,18	3,50	0,74	3,17	19,94	3,11
I.10–I.11	t	0,16	1,08	0,43	1,73	0,65	2,70	4,48	2,73
	q _s	0,14	0,93	0,38	1,64	0,58	2,47	3,65	2,44
Ель гибридная с преобладанием признаков ели сибирской									
III.05–I.07	t	5,50	5,23	5,49	3,39	5,20	3,17	4,85	3,22
	q _s	5,78	5,76	5,86	3,54	5,54	3,46	5,12	3,64
III.05–I.08	t	4,07	3,62	3,97	2,99	3,82	0,77	3,70	0,63
	q _s	2,92	2,60	2,86	2,04	2,73	0,83	3,36	0,58
III.05–I.09	t	9,71	7,60	9,19	8,44	9,15	0,49	3,46	0,38
	q _s	8,32	6,31	7,78	7,40	7,79	0,44	3,02	0,33
III.05–I.10	t	11,32	8,24	10,76	10,99	11,04	0,80	1,13	0,76
	q _s	10,64	9,21	10,57	9,94	10,66	0,96	1,13	0,92
III.05–I.11	t	7,73	7,69	7,77	9,60	8,14	3,35	3,60	3,47
	q _s	8,03	8,72	8,25	9,93	8,61	4,59	3,48	5,13
I.07–I.08	t	0,03	1,24	0,39	0,23	0,29	3,47	2,52	3,47
	q _s	0,02	1,06	0,32	0,17	0,24	3,32	2,22	3,38
I.07–I.09	t	3,15	0,75	2,43	3,22	2,57	3,53	2,83	3,53
	q _s	2,92	0,67	2,21	3,01	2,34	3,09	2,88	3,20
I.07–I.10	t	2,68	0,32	1,96	4,85	2,49	2,71	7,28	2,77
	q _s	2,38	0,26	1,66	4,17	2,11	2,82	6,34	2,88
I.07–I.11	t	2,80	1,96	2,58	5,90	3,15	0,73	10,10	0,89
	q _s	2,52	1,62	2,24	5,42	2,78	0,67	8,34	0,83
I.08–I.09	t	2,50	2,18	2,43	2,40	2,43	0,38	0,49	0,35
	q _s	2,22	1,83	2,12	2,19	2,14	0,31	0,43	0,29

Окончание табл. 3

Сравниваемые периоды (декада месяца)	Показатель	X_a	X_b	X_{a+b}	K	$X_{a+b} + K$	X_a/X_b	X_{a+b}/K	ССК
I.08–I.10	t	1,99	1,88	1,99	3,69	2,29	0,20	7,68	0,31
	q_s	2,06	1,72	1,99	3,88	2,31	0,16	8,24	0,25
I.08–I.11	t	2,37	3,19	2,60	5,01	3,01	4,99	12,90	5,10
	q_s	2,95	4,12	3,29	6,66	3,85	4,41	10,50	4,50
I.09–I.10	t	1,12	0,66	1,03	1,87	0,56	0,47	7,43	0,55
	q_s	0,79	0,45	0,70	1,31	0,38	0,40	7,77	0,48
I.09–I.11	t	0,20	1,53	0,58	3,81	1,11	4,62	12,83	4,76
	q_s	0,22	1,67	0,65	4,05	1,25	5,54	10,60	5,78
I.10–I.11	t	1,07	2,20	1,42	2,62	1,65	2,94	3,87	3,00
	q_s	0,96	2,20	1,32	2,22	1,50	2,69	3,10	2,75

Примечание: t – критерий Стьюдента; q_s – критерий Тьюки.

Пониженное в период вегетации содержание каротиноидов, особенно в мае, обусловлено увеличением их расхода на обеспечение фотохимических функций зеленых пигментов [24]. У гибридной формы ели наблюдается существенное увеличение содержания каротиноидов в октябре–ноябре. Это повышает устойчивость фотосинтетического аппарата деревьев при подготовке к перезимовке. У ели сибирской значимый рост содержания каротиноидов в хвое отмечается только в ноябре по сравнению с маем, июлем и сентябрем. В летний и осенний периоды вплоть до завершения вегетации и подготовки к перезимовке у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской наблюдается накопление хлорофиллов a и b . Причем более активный синтез зеленых пигментов осенью происходит у гибридной формы. По-видимому, фотосинтетический аппарат ели сибирской проявляет меньшую чувствительность к повышению температуры в осенний сезон.

Изменения в пигментном комплексе являются неотъемлемой частью сложного процесса адаптации растений, позволяющего уменьшить количество поглощенной энергии, которая не используется для фотосинтеза [28]. В условиях сезонного климата функционирование фотозащитных механизмов вызывает заметные изменения в количественном и качественном составе фотосинтетических пигментов [18, 23, 32]. По нашим данным, в сезонной динамике соотношения хлорофиллов a и b у ели сибирской и ели гибридной можно отметить наибольшую величину этого показателя в мае. Вероятно, избыток осадков в июле (в 1,6 раза выше нормы) более негативно отразился на синтезе хлорофилла a , что привело к снижению его доли по отношению к хлорофиллу b , особенно у ели сибирской. Динамика соотношения хлорофиллов a и b у ели сибирской и ели гибридной схожа и связана с адаптацией фотосинтетического аппарата к условиям сезонного климата. Хлорофилл b содержится в пигмент-белковых ССК фотосистемы II [6, 7, 15, 25, 30], поэтому изменение соотношения хлорофиллов a и b может быть связано со сдвигом ее функционирования.

У ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской максимума соотношение суммы хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов достигает в июле, а минимума – в ноябре. У ели сибирской в июле этот показатель существенно выше по сравнению с маем, октябрем, ноябрем, а в августе – по сравнению с октябрем и ноябрем. У гибридной ели соотношение суммы хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в мае ощутимо меньше, чем в июле, августе, сентябре и ноябре. В июле этот показатель – значимо больше по сравнению с маем, сентябрем, октябрем и ноябрем, а в августе и сентябре – существенно больше, чем в октябре и ноябре (табл. 4). Характер сезонной динамики соотношения суммы хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской схожий. Наблюдается повышение показателя в летние месяцы и сентябре, характеризовавшемся температурой воздуха гораздо выше нормы, а уменьшение – в октябре–ноябре, в основном за счет роста содержания в хвое каротиноидов. Защитная роль каротиноидов при подготовке фотосинтетического аппарата ели к перезимовке в условиях сезонного климата возрастает.

Изменение соотношения хлорофиллов *a/b* и суммы хлорофиллов и каротиноидов свидетельствует о перестройке ССК [3, 32]. Амплитуда колебаний доли хлорофиллов, локализованных в ССК, у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской с мая по ноябрь незначительна и в среднем по месяцам составляет 55–62 %. В сезонной динамике этого показателя выявлены 2 максимума: летний в июле и осенний в ноябре. У ели сибирской в июле количество пигментов существенно выше, чем в мае, августе, сентябре и октябре, а в ноябре – в сентябре и октябре. У гибридной формы ели наблюдаются значительные различия соотношений пигментов между июлем и другими месяцами (кроме ноября), а также между ноябрем и другими месяцами (кроме июля).

Двухфакторный анализ ANOVA подтверждает надежность влияния типа семенных чешуй на содержание хлорофиллов *a* и *b* и сезона на все показатели фотосинтетического пигментного комплекса ели.

Таблица 4

Результаты двухфакторного анализа ANOVA влияния сезона и формы семенных чешуй на фотосинтетический пигментный комплекс 1-летней хвои
Results of two-way ANOVA of the influence of season and seed scale shapes on the photosynthetic pigment complex of annual needles

Детерминируемый признак	Сезон ($F_{0,05} = 2,30$)		Форма семенных чешуй ($F_{0,05} = 3,93$)		Совместный фактор ($F_{0,05} = 2,30$)	
	F	P	F	P	F	P
<i>Xa</i>	19,21	<0,001	3,96	0,049	2,21	0,059
<i>Xb</i>	17,67	<0,001	4,02	0,048	2,14	0,066
<i>Xa + b</i>	19,21	<0,001	3,96	0,049	2,21	0,059
K	33,22	<0,001	2,76	0,100	2,05	0,078
<i>Xa + b + K</i>	20,49	<0,001	3,79	0,054	2,20	0,060
<i>Xa/ Xb</i>	11,30	<0,001	0,55	0,458	0,49	0,786
<i>Xa + b / K</i>	65,58	<0,001	3,84	0,053	0,87	0,503
ССК	12,38	<0,001	0,55	0,458	0,43	0,830

Примечание: $F_{0,05}$ – F-критерий на 5%-м уровне значимости; P – уровень значимости.

Заключение

В летний и осенний периоды до завершения вегетации и при подготовке к перезимовке у ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской в северной тайге Архангельской области наблюдается накопление хлорофиллов *a* и *b*. Причем более активный синтез зеленых пигментов в условиях теплой осени происходит у гибридной формы. По-видимому, фотосинтетический аппарат ели сибирской проявляет меньшую чувствительность по сравнению с гибридной формой ели при повышении температуры в осенний сезон. Динамика относительных величин отношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* и суммы хлорофиллов *a* и *b* к каротиноидам у них схожа. Максимально соотношение хлорофиллов *a* и *b* в мае, перед началом роста побегов. Отмечено повышение этого показателя в летние месяцы, а также в условиях теплого сентября, а уменьшение – в октябре–ноябре, особенно при наступлении морозов перед перезимовкой, в основном за счет накопления в хвое каротиноидов. Защитная роль каротиноидов перед перезимовкой возрастает.

Диапазон изменения доли хлорофиллов, локализованных в светособирающих комплексах ели сибирской и ели гибридной с преобладанием признаков ели сибирской, с мая по ноябрь в среднем по месяцам узкий и составляет 55–62 %, что обусловлено адаптацией фотосинтетического пигментного комплекса к экологическим условиям высоких широт. В сезонной динамике этого показателя выделены 2 максимума – в июле и ноябре.

Состав и свойства пигментов фотосинтетического аппарата могут использоваться в качестве дополнительного критерия при селекции ели по признаку устойчивости к экстремальным факторам среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Еришов П.В. Генотипическая обусловленность пигментного состава хвои плюсовых деревьев ели европейской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 63–76.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Ershov P.V. Genotypic Conditionality of Plus Tree Needle Pigment Composition of Norway Spruce. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 1, pp. 63–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.63>

2. Есичев А.О. Корреляция признаков пигментного состава хвои представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в дендропарке Сергачского лесничества Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 3. С. 43–53.

Esichev A.O. Correlation of Characteristics of the Needle Pigment Combination of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Arboretum of the Sergachsky Forestry in the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 3, pp. 43–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.43>

3. Иванов Л.А., Ронжина Д.А., Юдина П.К., Золотарева Н.В., Калашикова И.В., Иванова Л.А. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях степных и лесных растений на уровне вида и сообщества // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 3. С. 278–288.

Ivanov L.A., Ronzhina D.A., Yudina P.K., Kalashnikova I.V., Ivanova L.A., Zolotareva N.V. Seasonal Dynamics of the Chlorophyll and Carotenoid Content in the Leaves of Steppe and Forest Plants on Species and Community Level. *Fiziologiya rastenii* = Russian Journal of Plant Physiology, 2020, vol. 67, no. 3, pp. 278–288. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015330320030112>

4. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / под ред. К.С. Бобковой, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 337 с.

Virgin Spruce Forest of the North: Biodiversity, Structure, Functions. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2006. 337 p. (In Russ.).

5. Коропачинский И.Ю., Потемкин О.Н., Рудиковский А.В., Кузнецова Е.В. Поллиморфизм и структура популяций ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на северном пределе распространения вида // Сиб. экол. журн. 2012. Т. 19, № 2. С. 175–184.

Koropachinskiy I.Y., Potemkin O.N., Rudikovskiy A.V., Kuznetsova E.V. Polymorphism and Structure of Populations of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) at the Northern Limits of the Species Distribution. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal* = Contemporary Problems of Ecology, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 175–184. (In Russ.).

6. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С., Шерстнева О.А., Буболо Л.С., Зубкова Е.К. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата у зимневегетирующих хвойных растений в различные сезоны года // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 5. С. 672–681.

Maslova T.G., Mamushina N.S., Sherstneva O.A., Bubolo L.S., Zubkova E.K. Structural and Functional Changes in the Photosynthetic Apparatus of Winter-Vegetating Coniferous Plants in Different Seasons. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 672–681. (In Russ.).

7. Петров К.А., Софронова В.Е., Бубякина В.В., Перк А.А., Татаринова Т.Д., Пonomарев А.Г., Чепалов В.А., Охлопкова Ж.М., Васильева И.В., Максимов Т.Х. Древесные растения Якутии и низкотемпературный стресс // Физиология растений. 2011. Т. 58, № 6. С. 866–874.

Petrov K.A., Sofronova V.E., Bubyakina V.V., Perk A.A., Tatarinova T.D., Ponomarev A.G., Chepalov V.A., Okhlopko Zh.M., Vasilieva I.V., Maksimov T.Kh. Woody Plants of Yakutia and Low-Temperature Stress. *Fiziologiya rastenij* = Russian Journal of Plant Physiology, 2011, vol. 58, pp. 1011–1019. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1021443711060148>

8. Попов П.П. Ель европейская и сибирская: структура, интерградация и дифференциация популяционных систем. Новосибирск: Наука, 2005. 230 с.

Popov P.P. *European and Siberian Spruce: Structure, Intergradation and Differentiation of Population Systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 230 p. (In Russ.).

9. Попов П.П. Формовая структура и таксономическая принадлежность промежуточных популяций ели европейской и сибирской // Лесоведение. 2007. № 4. С. 59–67.

Popov P.P. Form Structure and Taxonomic Affiliation of Intermediate Populations of European and Siberian Spruce. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2007, no. 4, pp. 59–67. (In Russ.).

10. Попов П.П. Фенотипическое разнообразие семенных чешуй северодвинских популяций ели и их таксономическая интерпретация // Ботанич. журн. 2010. Т. 95, № 5. С. 647–656.

Popov P.P. The Phenotypic Diversity of Cone Scales in the Northern Dvina Spruce Populations, and Their Taxonomic Interpretation. *Botanicheskij zhurnal*, 2010, vol. 95, no. 5, pp. 647–656. (In Russ.).

11. Попов П.П. Распространение особей промежуточной формы в популяциях елей европейской и сибирской // Сиб. лесн. журн. 2018. № 4. С. 13–19.

Popov P.P. The Distribution of Individuals of Intermediate Form in the Populations of Norway and Siberian Spruces. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2018, no. 4, pp. 13–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20180402>

12. Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П. Фенотипическая структура популяций ели на Европейском Севере России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 9–20.

Popov P.P., Kazantseva M.N., Arefyev S.P. Phenotypic Structure of Spruce Populations in the European North of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 2, pp. 9–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-9-20>

13. Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 178 с.
Pravdin L.F. *European Spruce and Siberian Spruce in the USSR*. Moscow, Nauka, Publ., 1975. 178 p. (In Russ.).
14. Практикум по физиологии растений / под ред. Н.Н. Третьякова, Т.В. Карнауковой, Л.А. Паничкина, Н.В. Пильщиковой, В.Г. Земского, Л.В. Можаяева, А.Е. Петрова-Спиридонова, Я.М. Геллермана, М.Н. Кондратьева, М.И. Калинкевич, Е.Е. Крастиной, К.И. Каменской. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
Workshop on Plant Physiology. Ed. by N.N. Tretyakov, T.V. Karnaukhova, L.A. Panichkin, N.V. Pilshchikova, V.G. Zemskiy, L.V. Mozhaev, A.E. Petrov-Spiridonov, Ya.M. Gellerman, M.N. Kondratyev, M.I. Kalinkievich, E.E. Krastina, K.I. Kamenskaya. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 271 p. (In Russ.).
15. Придача В.Б., Туманик Н.В., Семин Д.Е. Влияние абиотических факторов на содержание азота, пигментный комплекс и параметры водного обмена хвои *Pinus sylvestris* (Pinaceae) на посттехногенных землях // Растит. ресурсы. 2024. Т. 60, № 3. С. 63–79.
Pridacha V.B., Tumanik N.V., Semin D.E. Abiotic Impacts on Nitrogen Content, Pigment Complex and Water Exchange Parameters of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Needles on Post-Industrial Lands. *Rastitel'nyye resursy* = Vegetation Resources, 2024, vol. 60, no. 3, pp. 63–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033994624030042>
16. Розенцвет О.А., Шуйская Е.В., Богданова Е.С., Нестеров В.Н., Иванова Л.А. Структура хлоренхимы и липидный профиль мембран в листьях галофитов сем. Chenopodiaceae с разным типом фотосинтеза // Физиология растений. 2022. Т. 69, № 1. С. 68–79.
Rozentsvet O.A., Bogdanova E.S., Nesterov V.N., Shuyskaya E.V., Ivanova L.A. Structure of Chlorenchyma and the Profile of Membrane Lipids in Leaves of Halophytic Chenopodiaceae Species with Different Types of Photosynthesis. *Fiziologiya rastenii* = Russian Journal of Plant Physiology, 2022, vol. 69, no. 1, pp. 68–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015330322010171>
17. Складаров Г.А., Шарова А.С. Почвы лесов Европейского Севера. М.: Наука, 1970. 271 с.
Sklyarov G.A., Sharova A.S. *Soils of Forests of the European North*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 271 p. (In Russ.).
18. Софронова В.Е., Чепалов В.А., Дымова О.В., Головко Т.К. Роль пигментной системы вечнозеленого кустарничка *Ephedra monosperma* в адаптации к климату центральной Якутии // Физиология растений. 2014. Т. 61, № 2. С. 266–274.
Sofronova V.E., Chepalov V.A., Dymova O.V., Golovko T.K. The Role of Pigment System of an Evergreen Dwarf Shrub *Ephedra Monosperma* in Adaptation to the Climate of Central Yakutia. *Fiziologiya rastenii* = Russian Journal of Plant Physiology, 2014, vol. 61, no. 2, pp. 266–274. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S001533031401014X>
19. Тарханов С.Н. Популяционная изменчивость ели финской по форме семенных чешуй на севере Архангельской области // Лесоведение. 2019. № 3. С. 208–214.
Tarkhanov S.N. Population Variability of Finnish Spruce from the Seed Scale Forms in Northern Arkhangelsk Oblast. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 3, pp. 208–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819020116>
20. Титова М.С. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies* и *Picea koraiensis* // Вестник ОГУ. 2010. № 12(118). С. 9–12.
Titova M.S. Content of Photosynthetic Pigments in Needles of *Picea abies* and *Picea koraiensis*. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2010, no. 12(118), pp. 9–12. (In Russ.).
21. Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Григорьев А.А. Экологическая пластичность пигментного комплекса хвои в горных и равнинных ценопопуляциях можжевельника обыкновенного // Лесоведение. 2021. Т. 4, № 4. С. 354–362.
Tishkina E.A., Semkina L.A., Grigoriev A.A. Ecological Plasticity of *Juniperus communis* L. Needles Pigment Complex in Highland and Lowland Coenopopulations.

Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science, 2021, vol. 4, no. 4, pp. 354–362. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821040100>

22. Тужилкина В.В. Фотосинтетические пигменты хвои ели сибирской в средне-таежных лесах Европейского Северо-Востока России // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 65–73.

Tuzhilkina V.V. Photosynthetic Pigments of Siberian Spruce Needles in the Middle Taiga Forests of the European North-East of Russia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 1, pp. 65–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170107>

23. Яцко Я.Н., Дымова О.В., Головки Т.К. Пигментный комплекс зимне- и вечнозеленых растений в подзоне средней тайги европейского Северо-Востока // Ботан. журн. 2009. Т. 94, № 12. С. 1812–1820.

Yatsko Ya.N., Dymova O.V., Golovko T.K. Pigment Complex of Ever- And Wintergreen Plants in the Middle Taiga Subzone of the European North-East. *Botanicheskii zhurnal* = Botanical Journal, 2009, vol. 94, no. 12, pp. 1812–1820. (In Russ.).

24. Aguil S., Ahmad S.H., Reshi Z.Ah., Mahmooduzzafar N., Iqbal M. Physiological and Biochemical Response of *Albizia lebbek* (L.) Benth. to Coal Smoke Pollution. *Pollution Research*, 2003, vol. 22, no. 4, pp. 489–493.

25. Dall'Osto L., Lico C., Alric J., Giuliano G., Havaux M., Bassi R. Lutein is Needed for Efficient Chlorophyll Triplet Quenching in the Major LHCII Antenna Complex of Higher Plants and Effective Photoprotection *in vivo* under Strong Light. *BMC Plant Biology*, 2006, vol. 6, art. 32. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-6-32>

26. Demmig-Adams B., Adams W.W., III. Photoprotection in an Ecological Context: The Remarkable Complexity of Thermal Energy Dissipation. *New Phytologist*, 2006, vol. 172, iss. 1, pp. 11–21. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01835.x>

27. Johnson M.P., Havaux M., Triantaphylides Ch., Ksas B., Pascal A.A., Robert B., et al. Elevated Zeaxanthin Bound to Oligomeric LHCII Enhances the Resistance of Arabidopsis to Photooxidative Stress by a Lipid Protective, Antioxidant Mechanism. *Journal of Biological Chemistry*, 2007, vol. 282, iss. 31, pp. 22605–22618. <https://doi.org/10.1074/jbc.M702831200>

28. Oquist G., Huner N.P.A. Photosynthesis of Overwintering Evergreen Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, vol. 54, pp. 329–355. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.072402.115741>

29. Popov P.P. Form Structure and Geographic Differentiation of Spruce Populations in Northwestern Russia. *Russian Journal of Ecology*, 2010, vol. 41, no. 5, pp. 378–385. <https://doi.org/10.1134/S1067413610050036>

30. Sofronova V.E., Antal T.K., Dymova O.V., Golovko T.K. Photoprotective Mechanisms in Photosystem II of *Ephedra monosperma* During Development of Frost Tolerance. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 751–759. <https://doi.org/10.1134/S1021443714060181>

31. Sofronova V.E., Dymova O.V., Golovko T.K., Chepalov V.A., Petrov K.A. Adaptive Changes in Pigment Complex of *Pinus sylvestris* Needles upon Cold Acclimation. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 433–442. <https://doi.org/10.1134/S1021443716040142>

32. Verhoeven A. Sustained Energy Dissipation in Winter Evergreens. *New Phytologist*, 2014, vol. 201, iss. 1, pp. 57–65. <https://doi.org/10.1111/nph.12466>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Научная статья

УДК 712.4:635.9

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-110-122

Повышение аттрактивности рекреационных комплексов декоративными экзотическими растениями

Н.М. Кузьмина, *ст. науч. сотр.*; ResearcherID: [AAN-9371-2021](https://orcid.org/0000-0002-0430-930X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0430-930X>

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Отдел интродукции и акклиматизации растений, г. Ижевск, Россия; kuzmina1956@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.25 / Одобрена после рецензирования 22.07.25 / Принята к печати 24.07.25

Аннотация. Одним из важнейших свойств рекреационных комплексов является аттрактивность (привлекательность). На нее положительно влияют декоративные качества растений. Целью исследования стало изучение биоэкологических свойств редко используемых в озеленении городов Среднего Предуралья экзотов *Juglans cinerea* L., *J. nigra* L., *J. regia* L., *Corylus colurna* L., *Aesculus hippocastanum* L., *A. × carnea* Zeyh., *A. glabra* Willd., *Catalpa bignonioides* Walter, *C. × erubescens* Carr., *Acer pseudosieboldianum* (Pax.) Kom., *Robinia pseudoacacia* L., *R. viscosa* Vent. и определение перспективности их применения. Представлена характеристика декоративных качеств изученных видов. Определена их зимостойкость по 7-балльной шкале Главного ботанического сада РАН в период 2016–2024 гг. Приведены данные фенологических наблюдений 2021–2024 гг. Для интегральной оценки перспективности интродукции использована методика Главного ботанического сада РАН. Самую высокую зимостойкость имеют представители рода *Aesculus* L. Близка к высокой зимостойкости *J. cinerea*, *J. nigra*, *J. regia*, *Corylus colurna* и *Acer pseudosieboldianum*. На 3-м месте по зимостойкости стоят экземпляры рода *Catalpa* Scop. Самая низкая зимостойкость характерна для рода *Robinia* L. Отмечены древесные культуры с наиболее ранним началом вегетации (*Corylus colurna*, *Aesculus hippocastanum*, *A. × carnea*, *A. glabra*, *Acer pseudosieboldianum*) и более поздним (*Juglans*, *Catalpa* и *Robinia*). Выявлены 2 группы исследуемых культур по количеству расцвеченных листьев к концу вегетации: 100 % расцвечивание и с оставшимися зелеными листьями. По оценке перспективности интродукции только *Robinia viscosa* попадает в группу неперспективных из-за низкой зимостойкости. Остальные исследуемые экзоты благодаря хорошей зимостойкости и необычности внешнего вида для региона Среднего Предуралья в сочетании с декоративностью перспективны в озеленении и могут повысить аттрактивность мест отдыха населения в городской среде.

Ключевые слова: древесные экзоты, аттрактивность растений, декоративность растений, декоративные растения, Среднее Предуралье, зимостойкость, городское озеленение, интродукция, перспективность интродукции

Благодарности: Выражается благодарность доктору с.-х. наук А.В. Федорову за предоставление посадочного семенного материала *Robinia viscosa* и *Aesculus × carnea*.

Для цитирования: Кузьмина Н.М. Повышение аттрактивности рекреационных комплексов декоративными экзотическими растениями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 110–122. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-110-122>



Original article

Increasing the Attractiveness of Recreational Complexes with Ornamental Exotic Plants

Nadezhda M. Kuzmina, Senior Research Scientist; ResearcherID: [AAN-9371-2021](https://orcid.org/0000-0002-0430-930X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0430-930X>

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Department of Plant Introduction and Acclimatization, Izhevsk, Russia; kuzmina1956@mail.ru

Received on April 28, 2025 / Approved after reviewing on July 22, 2025 / Accepted on July 24, 2025

Abstract. Attractiveness is one of the most important properties of recreational complexes. The ornamental features of plants have a positive impact on their attractiveness. The research aimed at exploring the bioecological properties of exotic plant species rarely used in urban landscaping in the Middle Urals and assessing their potential for use. Among the studied exotic species were *Juglans cinerea* L., *J. nigra* L., *J. regia* L., *Corylus colurna* L., *Aesculus hippocastanum* L., *A. × carnea* Zeyh., *A. glabra* Willd., *Catalpa bignonioides* Walter, *C. × erubescens* Carr., *Acer pseudosieboldianum* (Pax.) Kom., *Robinia pseudoacacia* L., *R. viscosa* Vent. The paper describes the ornamental features of the studied species. Their winter hardiness was assessed using the 7-point scale of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences for the period between 2016 and 2024. This paper provides data of phenological observations carried out over the period 2021–2024. We used the methodology developed by the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences to provide an overall assessment of the species introduction feasibility. Species of the genus *Aesculus* L. are the most resistant to winter conditions. *J. cinerea*, *J. nigra*, *J. regia*, *Corylus colurna*, and *Acer pseudosieboldianum* have close to high winter hardiness. Specimens of the genus *Catalpa* Scop. rank third in terms of winter hardiness. The genus *Robinia* L. shows the lowest winter hardiness. Tree species with the earliest onset of the growing season (*Corylus colurna*, *Aesculus hippocastanum*, *A. × carnea*, *A. glabra*, *Acer pseudosieboldianum*) and those with a later onset (*Juglans*, *Catalpa*, and *Robinia*) have been observed. The research revealed two groups of crops based on the number of colored leaves by the end of the growing season: those with 100 % colored leaves and those with some green leaves remaining. In terms of the prospects for introduction, only *Robinia viscosa* is classified as unpromising due to its low winter hardiness. The other exotic species studied, owing to their good winter hardiness and unusual appearance for the Middle Urals region, together with their ornamental features, show potential for landscaping and could enhance the attractiveness of public recreation areas in urban settings.

Keywords: exotic woody plants, plant attractiveness, ornamental value of plants, ornamental plants, Middle Urals, winter hardiness, urban landscaping, introduction, potential for introduction.

Acknowledgments: Special thanks to Doctor of Agriculture A.V. Fedorov for providing planting seeds of *Robinia viscosa* and *Aesculus × carnea*.

For citation: Kuzmina N.M. Increasing the Attractiveness of Recreational Complexes with Ornamental Exotic Plants. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 110–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-110-122>

Введение

В последние годы большое внимание уделяется благоустройству зон кратковременного отдыха населения в городской среде. Одним из важнейших свойств рекреационных комплексов является аттрактивность (привлекательность). В настоящее время все больше специалистов считают, что аттрактивные свойства ландшафтов являются одной из ключевых характеристик, определяющих рекреационный потенциал места. Аттрактивность местности определяется в т. ч. эстетическими показателями мест отдыха. Декоративные качества растений играют в этом существенную роль [5, 24].

Декоративные экзоты благодаря своей необычности для региона интродукции добавляют облику города эстетическую привлекательность, несут познавательную информацию о древесной растительности регионов России и других стран, что повышает аттрактивность мест отдыха населения [24].

Тема декоративности древесных растений в городских условиях отражена в трудах отечественных ученых [7, 17, 18]. Для Европейского Севера вопрос изучения декоративности деревьев и кустарников в урбаносистемах особенно актуален. Учеными Северного (Арктического) федерального университета О.С. Залывской и Н.А. Бабичем разработана шкала оценки декоративности насаждений в городских условиях. Предлагаемая методология предполагает оценку в каждый из сезонов [6]. Большая работа по изучению древесных интродуцентов проведена сотрудниками Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН [2, 4].

Глобальное потепление создает условия для интродукции древесных растений, которые могут расширить ассортимент видов и разнообразие их полезных свойств. Глобальное потепление стало причиной понижения интенсивности заморозков, что позволяет вводить в культуру новые виды растений. Так, Д.А. Адаховский приводит данные изменения средней годовой температуры воздуха по г. Ижевску: в 1991–2020 гг. оно составило $3,3 \pm 0,29$ °C [1]. Данная тенденция позволяет вводить в культуру новые виды древесных экзотов и в Среднем Предуралье. Поэтому необходимость изучения их биологических и экологических свойств является актуальной для региона.

На базе территории Отдела интродукции и акклиматизации растений Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН (г. Ижевск) с 2006 г. ведется наблюдение за редко используемыми в озеленении городов Среднего Предуралья и новыми древесными экзотами.

Цель исследования – изучение биологических и экологических свойств редко используемых в озеленении городов Среднего Предуралья древесных экзотов коллекции Отдела интродукции и акклиматизации растений с определением перспективности их использования для повышения аттрактивности зон отдыха.

Задачи: определить аттрактивные декоративные признаки исследуемых экзотов при интродукции в Среднем Предуралье и выявить особенности биоэкологических свойств исследуемых древесных экзотов в условиях Среднего Предуралья.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были выбраны 12 редких и новых древесных декоративных экзотов (табл. 1) из коллекции Отдела интродукции и акклиматизации растений.

Таблица 1

Характеристика исследуемых экзотов
Description of the studied exotic species

Вид	Семейство	Происхождение		Возраст культуры, лет
		вида	посадочного материала	
<i>Juglans cinerea</i> L.	<i>Juglandaceae</i> DC. ex Perleb и A.Rich. ex Kunth	Северная Америка	Самара, ботанический сад, 2011, орехи	13
<i>J. nigra</i> L.		Средняя Азия		13
<i>J. regia</i> L.				13
<i>Corylus colurna</i> L.	<i>Betulaceae</i> Gray	Юго-Восточная Европа, Западная Азия (Турция и Иран), Кавказ (Россия, Грузия и Азербайджан)	Адыгея, ботанический сад УГА, 2014, семена	10
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	<i>Sapindaceae</i> Juss.	Юг Балканского п-ова	Ижевск, 2010, орехи	14
<i>A. × carnea</i> Zeyh.		Германия	Украина, 2012, орехи	12
<i>A. glabra</i> Willd.		Северная и Центральная Америка	ГБС, дендрарий, 2016, орехи	8
<i>Catalpa bignonioides</i> Walter	<i>Bignoniaceae</i> Juss.	Юго-восточная часть Северной Америки	Самара, ботанический сад, 2011, 2-летние сеянцы	15
<i>C. × erubescens</i> Carr.		Северная Америка, Юго-Восток США		15
<i>Acer pseudosieboldianum</i> (Pax.) Kom.	<i>Sapindaceae</i> Juss.	Северо-восточная часть Китая, Кореи	ГБС, дендрарий, 2016, семена	7
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	<i>Fabaceae</i> Juss.	Северная Америка	Ижевск, 2007, корневой отпрыск	17
<i>R. viscosa</i> Vent.			Украина, 2014, семена	10

Город Ижевск (56°50'59,3" с. ш. 53°12'16,2" в. д.) находится в Среднем Предуралье. Климат территории умеренно континентальный с продолжительной многоснежной зимой, теплым летом, хорошо выраженными переходными сезонами (весна и осень) и достаточным увлажнением [21].

Наличие декоративных признаков у исследуемых экзотов определено по методике Н.А. Баби́ча, О.С. Залы́вской, Г.И. Травнико́вой [3].

Зимостойкость растений оценивалась по 7-балльной шкале ГБС РАН, предложенной П.И. Лапиным и С.В. Сидневой (1973 г.): I – растения не обмерзают; II – обмерзает не более 50 % длины 1-летних побегов; III – обмерзает от 50 до 100 % длины 1-летних побегов; IV – обмерзают более старые побеги; V – обмерзает надземная часть до снегового покрова; VI – обмерзает вся надземная часть; VII – растения вымерзают целиком [12, 13].

Фенологические исследования проводились по общепринятой методике наблюдений в ботанических садах [15].

Для интегральной оценки перспективности интродукции использовали методику, разработанную в ГБС РАН [13].

По методике Ю.Н. Карпун подведены предварительные итоги первичной и вторичной интродукции [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Видовой состав декоративных древесных растений, способный повысить аттрактивность мест отдыха населения, должен отличаться от основного видового состава озеленения городов уникальными декоративными признаками входящих в него растений (необычные листья, цветы, плоды). В табл. 2 представлено наличие декоративных признаков у исследуемых экзотов.

Таблица 2

Наличие декоративных признаков у исследуемых экзотов
Presence of ornamental features in the exotic plant species

Вид	Форма		Величина листьев	Цветы	Плоды	Осеннее расцветивание
	кроны	листьев				
<i>Juglans cinerea</i>	+	+	+	—	+	+
<i>J. nigra</i>	+	+	+	—	+	+
<i>J. regia</i>	+	+	+	—	+	+
<i>Corylus colurna</i>	+	—	—	+	+	—
<i>Aesculus hippocastanum</i>	+	+	+	+	+	+
<i>A. × carnea</i>	+	+	+	+	+	+
<i>A. glabra</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Catalpa bignonioides</i>	+	+	+	+	+	—
<i>C. erubescens</i>	—	+	—	+	+	—
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	+	+	—	+	+	+
<i>Robinia pseudoacacia</i>	+	+	+	+	—	—
<i>R. viscosa</i>	+	+	+	+	—	—

Все исследуемые экзоты имеют несколько декоративных признаков и многими исследователями считаются высокодекоративными [7, 16–19]. Аттрактивными декоративными признаками для региона Среднего Предуралья являются крупные пирамидальные прямостоячие колосовидные соцветия у представителей рода *Aesculus* [7, 14, 17], крупные кисти у видов рода *Catalpa* и *Robinia* [14, 16, 20], крупные перистые листья и орехи, обладающие хорошими пищевыми свойствами [19] у растений *Juglans*. Необычайно яркая красная осенняя окраска *Acer pseudosieboldianum* позволяет использовать данную культуру в дизайне японского сада. *Acer pseudosieboldianum* также имеет необычные пальчато-лопастные листья с 9–11 долями небольшого размера [9]. *Corylus colurna* характеризуется древовидной формой в отличие от кустовидной формы *C. avellana*, произрастающей в Среднем Предуралье.

Для успешной интродукции древесные растения должны обладать достаточной для региона внедрения в культуру зимостойкостью. В табл. 3 представлены результаты наблюдений за зимостойкостью исследуемых культур за последние 9 лет (2016–2024) в условиях Среднего Предуралья.

Таблица 3

**Зимостойкость (балл) исследуемых экзотов в 2016–2024 гг.
в условиях Среднего Предуралья**
Winter hardiness (points) of the exotic plant species in 2016–2024 in the Middle Urals

Вид	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Среднее
<i>Juglans cinerea</i>	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1,2
<i>J. nigra</i>	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1,5
<i>J. regia</i>	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1,3
<i>Corylus colurna</i>	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1,2
<i>Aesculus hippocastanum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0
<i>A. × carnea</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0
<i>A. glabra</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0
<i>Catalpa bignonioides</i>	1	3	3	3	2	1	1	2	1	1,8
<i>C. erubescens</i>	1	3	2	2	2	1	1	2	1	1,6
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1,3
<i>Robinia pseudoacacia</i>	2	4	3	1	1	1	1	4	3	2,2
<i>R. viscosa</i>	2	2	2	2	2	5	3	3	3	2,7

По шкале ГБС РАН самую высокую зимостойкость из исследуемых растений имеют представители рода *Aesculus*. У *A. glabra* в 2025 г. зафиксировано первое цветение. У *A. hippocastanum* и *A. × carnea* цветение не отмечено, скорее всего, причина в том, что растения расположены в корневой зоне средневозрастных берез. Можно предположить, что березы своей поверхностной корневой системой забирают влагу и элементы питания у более молодых культур *Aesculus*, тем самым тормозя их развитие. *A. hippocastanum* цветут и плодоносят каждый год. В Москве *A. × carnea* цветут ежегодно [18]. Исследования, проведенные в Вологодской области, указывают на высокую декоративность и перспективность *Aesculus* в озеленении городской среды [7]. В районах массового произрастания *A. hippocastanum* часто поражается каштановой минирующей молью, из-за этого в некоторых европейских странах *Aesculus* в последнее время заменяют на *A. × carnea* и другие культуры [10, 25, 32]. При визуальном обследовании *A. hippocastanum* в г. Ижевске данного вредителя не обнаружено.

Близка к высокой зимостойкость *J. cinerea*, *J. nigra*, *J. regia*, *Corylus colurna* и *Acer pseudosieboldianum*. У данных культур в основном в первые годы после высадки семян фиксировалось обмерзание не более 50 % длины 1-летних побегов. Исследования редких экзотов в Москве показали, что *J. regia* и *C. colurna* имеют хорошее развитие и плодоносят каждый год [18]. Северной точкой культивирования *J. regia* является Ботанический сад Петра Великого в Санкт-Петербурге (59°57' с. ш. 30°19' в. д.) [11, 22].

Кроме того, для некоторых форм *J. regia* из Центральной и Восточной Европы, Китая свойственен апомиксис, т. е. закладка плодов возможна в отсутствие опыления [11, 26, 28, 30]. Для сортообразца № 2 культуры *J. regia*, отобранного по результатам исследований 2013–2021 гг. для дальнейшего изучения, характерен этот признак. Замечено, что, зачастую женские почки вскрываются после опадения мужских сережек, но плодоношение фиксируется каждый год [11]. Это особенно важно при возврате весенних заморозков, которые фиксируются в Среднем Предуралье.

На 3-е место по зимостойкости можно поставить представителей рода *Catalpa*. Средний балл морозостойкости за последние 9 лет – 1,6–1,8. У видов в первые годы после высадки саженцев фиксировалось обмерзание от 50 до 100 % длины 1-летних побегов. В 2024 г. отмечено первое цветение у *C. bignonioides*, плодов не завязалось. В Москве *C. bignonioides* цветет и плодоносит каждый год [18].

Самой низкой зимостойкостью обладают представители рода *Robinia*, но они быстро восстанавливаются и цветут. Критической температурой воздуха для *R. pseudoacacia* считалась температура –25 °С. Как показали исследования в сухостепной зоне Нижнего Поволжья, этот порог в процессе акклиматизации значительно снизился и составляет –37 °С [29, 31]. *R. viscosa* зачастую обмерзает до уровня снега. Исследователями отмечается повторное цветение данной культуры осенью [29]. Поэтому на вновь отрастающих побегах более 2 м в условиях Среднего Предуралья осенью расцветают розовые соцветия в виде кисти.

Немаловажное значение для интродукции новых видов имеет прохождение всех фаз вегетационного периода. В табл. 4 показано количество дней вегетационного периода исследуемых древесных растений за последние 4 года (2021–2024 гг.).

Таблица 4

Длительность вегетационного периода исследуемых экзотов в 2021–2024 гг.
Duration of the growing season of the exotic plant species in 2021–2024

Вид	2021		2022		2023		2024	
	Выход конуса	Конец листопада / продолжительность вегетационного периода, дней	Выход конуса	Конец листопада / продолжительность вегетационного периода, дней	Выход конуса	Конец листопада / продолжительность вегетационного периода, дней	Выход конуса	Конец листопада / продолжительность вегетационного периода, дней
<i>Juglans cinerea</i>	11.05	13.10/156	11.05	22.10/165	28.04	22.10/178	30.04	12.10/166
<i>J. nigra</i>	11.05	13.10/156	11.05	22.10/165	28.04	22.10/178	30.04	12.10/166
<i>J. regia</i>	11.05	13.10/156	08.05	22.10/168	28.04	22.10/178	30.04	12.10/166
<i>Corylus colurna</i>	27.04	18.10/175	04.05	22.10/172	24.04	22.10/182	20.04	12.10/176
<i>Aesculus hippocastanum</i>	27.04	18.10/175	27.04	22.10/179	24.04	22.10/182	20.04	12.10/176
<i>A. × carnea</i>	27.04	18.10/175	27.04	22.10/179	24.04	22.10/182	20.04	12.10/176
<i>A. glabra</i>	23.04	18.10/179	24.04	22.10/182	20.04	22.10/186	16.04	12.10/180
<i>Catalpa bignonioides</i>	11.05	18.10/156	11.05	22.10/165	12.05	22.10/164	30.04	12.10/166
<i>C. erubescens</i>	11.05	18.10/156	11.05	22.10/165	10.05	22.10/166	30.04	12.10/166
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	28.04	18.10/174	23.04	22.10/183	21.04	22.10/185	20.04	12.10/176
<i>Robinia pseudoacacia</i>	08.05	18.10/159	11.05	22.10/165	25.06	22.10/120	30.04	12.10/166
<i>R. viscosa</i>	18.05	18.10/149	11.05	22.10/165	10.05	22.10/166	10.05	12.10/156

По данным табл. 4 хорошо видно, что даты начала и конца вегетации за годы наблюдений отличаются, т. к. они зависят от погодных условий конкретного года. Исследуемые культуры можно разделить на 2 группы: с наиболее ран-

ним началом вегетации (*Corylus colurna*, *Aesculus hippocastanum*, *A. × carnea*, *A. glabra*, *Acer pseudosieboldianum*) и более поздним (*Juglans cinerea*, *J. nigra*, *J. regia*, *Catalpa bignonioides*, *C. erubescens*, *Robinia pseudoacacia*, *R. viscosa*).

Дата начала вегетации исследуемых представителей рода *Catalpa* в более южном городе Киеве (Украина) и на территории Ижевска отличается незначительно. У видов рода *Catalpa* в Киеве начало вегетации отмечено в конце апреля – начале мая [27]. В Ижевске начало вегетации *Catalpa* обычно фиксируется в начале 2-й декады мая, но бывает и раньше.

Длительность вегетационного периода зависит от погодных условий и региона интродукции. Например, продолжительность вегетационного периода *Aesculus hippocastanum* в Брянской области в среднем составляет 189 дней [23]. В Вологодской области – 130 дней, но при этом отмечается обильное плодоношение и хорошее вызревание семян [7]. В нашем случае длительность вегетационного периода *A. hippocastanum* составляет в среднем 178 дней. Можно сделать вывод, что древесные растения постепенно приспосабливаются к региональным условиям произрастания.

О том, как древесное растение подготовилось к зимнему сезону, свидетельствует доля расцвеченных листьев к концу вегетации (листопада). В табл. 5 представлена сравнительная характеристика фенологической фазы осеннего расцвечивания листвы и доля расцвеченных листьев к концу листопада.

Таблица 5

Сравнительная характеристика фенологической фазы осеннего расцвечивания листвы и доля расцвеченных листьев к концу листопада у исследуемых экзотов
A comparative analysis of the phenological phase of autumn foliage coloration and the proportion of colored leaves by the end of leaf fall in the exotic plant species

Вид	2021		2022		2023		2024	
	Начало расцвечивания листьев	Конец листопада / доля расцвеченных листьев, %	Начало расцвечивания листьев	Конец листопада / доля расцвеченных листьев, %	Начало расцвечивания листьев	Конец листопада / доля расцвеченных листьев, %	Начало расцвечивания листьев	Конец листопада / доля расцвеченных листьев, %
<i>Juglans cinerea</i>	23.09	13.10/100	01.10	22.10/100	23.09	22.10/80	23.09	12.10/100
<i>J. nigra</i>	23.09	13.10/100	01.10	22.10/100	20.09	22.10/100	18.09	12.10/100
<i>J. regia</i>	21.09	13.10/100	20.09	22.10/100	23.09	22.10/100	23.09	12.10/100
<i>Corylus colurna</i>	15.09	18.10/60	28.09	22.10/90	18.09	22.10/60	10.09	12.10/40
<i>Aesculus hippocastanum</i>	20.09	18.10/100	23.09	22.10/100	23.09	22.10/100	23.09	12.10/100
<i>A. × carnea</i>	20.09	18.10/100	23.09	22.10/100	23.09	22.10/100	23.09	12.10/100
<i>A. glabra</i>	20.09	18.10/100	20.09	22.10/100	20.09	22.10/100	15.09	12.10/100
<i>Catalpa bignonioides</i>	13.09	18.10/70	15.09	22.10/80	18.09	22.10/70	15.09	12.10/60
<i>C. erubescens</i>	13.09	18.10/70	15.09	22.10/80	18.09	22.10/60	12.09	12.10/60
<i>Acer pseudosieboldianum</i>	8.09	18.10/100	10.09	22.10/100	06.09	22.10/100	02.09	12.10/100
<i>Robinia pseudoacacia</i>	8.10	18.10/20	20.09	22.10/50	Зеленые листья замерзли 22.10		22.09	12.10/30
<i>R. viscosa</i>	10.10	18.10/5	05.10	22.10/10			28.09	12.10/15

По данным табл. 5 можно сказать, что начало расцветивания листьев зависит от конкретной культуры и погодных условий, а конец вегетации – от наступления морозной погоды. В основном вегетационный период в Среднем Предуралье заканчивается во 2-й и 3-й декадах октября. Можно выделить 2 группы исследуемых культур по долевого участию расцветивших листьев к концу вегетации. К группе растений, у которых к этому моменту фиксируется 100 % расцветивших листьев, отнесены *Juglans cinerea*, *J. nigra*, *J. regia*, *Aesculus hippocastanum*, *A. × carnea*, *A. glabra*, *Acer pseudosieboldianum*. В группу с сохранением зеленого окраса части листьев вошли *Corylus colurna*, *Catalpa bignonioides*, *C. erubescens*, *Robinia pseudoacacia*, *R. viscosa*. В основном у данных экзотов отмечается низкая зимостойкость.

По итогам мониторинга проведена оценка перспективности интродукции исследуемых экзотов в условия Среднего Предуралья (табл. 6).

Таблица 6

**Оценка перспективности интродукции исследуемых экзотов
в условия Среднего Предуралья**
**Assessment of the introduction feasibility of the exotic plant species
in the Middle Urals**

Индекс	Значение индекса, количество баллов	Вид	Перспектив- ность, балл
I	Вполне перспективные, 91–100	<i>Aesculus hippocastanum</i>	92
		<i>Juglans regia</i>	91
II	Перспективные, 76–90	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	84
		<i>Aesculus glabra</i>	81
		<i>J. cinerea</i>	90
III	Менее перспективные, 61–75	<i>Robinia pseudoacacia</i>	75
		<i>Catalpa bignonioides</i>	74
		<i>Aesculus × carnea</i>	67
IV	Малоперспективные, 41–60	<i>Catalpa erubescens</i>	60
		<i>Corylus colurna</i>	60
		<i>J. nigra</i>	60
V	Неперспективные, 21–40	<i>Robinia viscosa</i>	39
VI	Абсолютно непригодные, 5–15	–	–

По результатам оценки перспективности интродукции исследуемых древесных экзотов только *R. viscosa* попадает в группу неперспективных из-за очень низкой зимостойкости. В группу малоперспективных интродуцентов входят культуры, которые еще не цвели в данных условиях произрастания, но имеют хорошую оценку зимостойкости и могут зацвести в ближайшие годы. Самую высокую оценку перспективности имеет *Aesculus hippocastanum*, который проходит вторичную стадию интродукции. К перспективным также отнесены *Juglans regia*, *J. cinerea*, *Acer pseudosieboldianum* и *Aesculus glabra*. По результатам исследований выделен сортообразец № 2 *J. regia* скороплодной формы, который плодоносит ежегодно с возраста 5 лет. Средняя масса плодов составляет $7,06 \pm 0,33$ г [11]. Близкими к перспективным признаны *Robinia pseudoacacia* и *Catalpa bignonioides*. В морозные зимы у данных культур наблюдалось небольшое обмерзание 1-летних побегов.

Исследуемые древесные экзоты проходят адаптацию на стадиях первичной и вторичной интродукции в условиях Среднего Предуралья.

Заключение

Исследование выявило уникальные для Среднего Предуралья декоративные свойства экзотов, предлагаемых для повышения аттрактивности рекреационных зон отдыха: крупные пирамидальные прямостоячие соцветия, кисти с большими цветками, необычайно крупные перистые листья, яркая осенняя окраска листвы и др.

Девятилетний мониторинг показал различную зимостойкость у исследуемых экзотов. Самый высокий показатель имеют представители рода *Aesculus*. Близка к высокой зимостойкости видов *J. cinerea*, *J. nigra*, *J. regia*, *Corylus colurna* и *Acer pseudosieboldianum*. Род *Catalpa* находится на 3-м месте. Для рода *Robinia* характерна самая низкая зимостойкость, но эти растения быстро восстанавливаются и цветут.

По результатам фенологических наблюдений выявлены группы с наиболее ранним и более поздним началом вегетации. Установлено, что длительность вегетационного периода древесных культур зависит от погодных условий, видовой принадлежности и региона интродукции.

Выявлены 2 группы по количеству расцвеченных листьев к концу вегетации (листопада): культуры со 100 % расцвечиванием листвы и культуры с частью оставшихся зеленых листьев. Можно предположить, что культуры *R. pseudoacacia*, *R. viscosa*, сохранившие значительное количество зеленых листьев, не завершили подготовку к зимнему периоду, и это отрицательно повлияло на их морозоустойчивость.

По целесообразности интродукции из исследуемых экзотов только *R. viscosa* признана неперспективной из-за крайне низкой зимостойкости. Остальные виды обладают потенциалом для озеленения зон отдыха в городской среде, повышая их привлекательность.

Таким образом, для солитерных посадок в скверах, парках и садах можно рекомендовать все исследуемые экзоты, кроме *R. viscosa*. Данную культуру можно использовать в экспозиционных садах, где обеспечивается уход за древесными растениями. Для аллейных посадок следует применять *Aesculus hippocastanum*, *J. cinerea*. *Acer pseudosieboldianum* наиболее подходит для садов в японском стиле. *J. regia* и *Corylus colurna* пригодна в сфере любительского садоводства для получения орехов с ценными пищевыми свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адаховский Д.А. Климатические и фенологические индикаторы современного потепления на территории Удмуртской Республики (на примере г. Ижевска) // Вестн. Удмуртск. ун-та. Сер.: Биология. Наука о земле. 2021. Т. 31, вып. 1. С. 57–64.

Adakhovskiy D.A. Climatic and Phenological Indicators of Modern Warming in the Territory of the Udmurt Republic (A Case Study of Izhevsk). *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 2021, vol. 31, iss. 1, pp. 57–64. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35634/2412-9518-2021-31-1-57-64>

2. Андреев Г.Н., Зуева Г.А. Натурализация интродуцированных растений на Кольском Севере. Апатиты, 1990. 122 с.

Andreev G.N., Zueva G.A. *Naturalization of Introduced Plants in the Kola North*. Apatity, 1990. 122 p. (In Russ.).

3. Бабич Н.А., Залывская О.С., Травникова Г.И. Интродуценты в зеленом строительстве северных городов: моногр. Архангельск: АГТУ, 2008. 144 с.

Babich N.A., Zalyvskaya O.S., Travnikova G.I. *Introduced Species in Green Construction of Northern Cities*: Monograph. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 144 p. (In Russ.).

4. Гонтарь О.Б., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н., Жиров В.К. Этапы создания и анализ особенностей ассортимента декоративных древесных растений для оптимального озеленения урбанизированных территорий Кольского Севера // Вестн. МГТУ. 2011. Т. 14, № 3. С. 577–582.

Gontar O.B., Svyatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N., Zhirov V.K. Stages of creation and analysis of the characteristics of the assortment of ornamental woody plants for optimal landscaping of urbanized areas of the Kola North. *Vestnik MGTU* = Bulletin of Moscow State Technical University, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 577–582. (In Russ.).

5. Гуляева Т.С. Аппривативность ландшафтов как ключевая характеристика рекреационного потенциала территории // География и водные ресурсы. 2012. № 3. С. 42–45.

Gulyaeva T.S. Attractiveness of Landscapes as a Key Parameter of a Region's Recreational Potential. *Questions of geography and geocology*, 2012, no. 3, pp. 42–45. (In Russ.).

6. Залывская О.С., Бабич Н.А. Оценка декоративности насаждений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 98–110.

Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Assessment of Plantations Ornamentality. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 6, pp. 98–110. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-98-110>

7. Карбасникова Е.Б. Оценка перспективности интродукции каштана конского обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) в условиях г. Вологды // Лесн. вестн. 2020. Т. 24, № 6. С. 58–64.

Karbasnikova E.B. Prospects of Common Horse Chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) Introduction in Vologda. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 58–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-58-64>

8. Карпун Ю.Н. Основы интродукции растений // Hortus botanicus. 2004. № 2. С. 17–32.

Karpun Yu.N. The Main Problems of Introduction. *Hortus botanicus*, 2004, no. 2, pp. 17–32. (In Russ.).

9. Козлова Е.А., Шарафутдинов Х.В., Симахин М.В., Лутфуллина К.Г. Анализ частоты встречаемости декоративных признаков некоторых представителей рода клен (*Acer*), используемых во флористике // Вестн. КрасГАУ. 2021. № 12. С. 73–80.

Kozlova E.A., Sharafutdinov Kh.V., Simakhin M.V., Lutfullina K.G. The Genus Maple (*Acer*) Representatives' Decorative Signs Frequency Analysis Used in Floristics. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KSAU, 2021, no. 12, pp. 73–80. (In Russ.).

<https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-12-73-80>

10. Светлицкая Л. Красный конский каштан, которому не страшна минирующая моль. 2021. Режим доступа: <https://www.botanichka.ru/article/krasnyiy-konskiy-kashtan-kotoromu-ne-strashna-miniruyushhaya-mol/> (дата обращения: 19.05.26).

Svetlitskaya L. *Red Horse Chestnut, Resistant to Leaf Miners*. 2021. (In Russ.).

11. Кузьмина Н.М., Федоров А.В. Биоэкологические особенности *Juglans regia* (Juglandaceae) при интродукции в условиях Среднего Предуралья // Растит. ресурсы. 2022. Т. 58, вып. 4. С. 366–375.

Kuzmina N.M., Fedorov A.V. Bioecological Features of *Juglans regia* (Juglandaceae) under Introduction in the Middle Urals. *Rastitelnye Resursy*, 2022, vol. 58, iss. 4, pp. 366–375. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033994622040070>

12. Лапин П.И., Александрова М.С., Бородин А.А., Макарова С.Н., Петрова И.П., Плотникова И.С., Сиднева С.В., Стогова С.В., Шербацевич В.Д., Якушина Э.И. Древесные растения Главного ботанического сада АН СССР. М.: Наука, 1975. 547 с.

Lapin P.I., Aleksandrova M.S., Borodina N.A., Makarova S.N., Petrova I.P., Plotnikova I.S., Sidneva S.V., Stogova S.V., Sherbatsevich V.D., Yakushina E.I. Woody Plants of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences. Moscow, Nauka Publ., 1975. 547 p. (In Russ.).

13. Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений. Опыт интродукции древесных растений: сб. науч. тр. М., 1973. С. 7–67.

Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessing the Potential for the Woody Plants Introduction Based on Visual Observations. *Experience in the Woody Plants Introduction: Collection of Academic Papers*. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 7–67. (In Russ.).

14. Махрова Т.Г., Сапелин А.Ю. Древесные интродуценты в составе насаждений ВДНХ // Лесн. вестн. 2016. Т. 20, № 1. С. 140–146.

Makhrova T.G., Sapelin A.Yu. The Introduced Species of Trees and Shrubs in the Plantations of VDNKh. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 140–146. (In Russ.).

15. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР / сост. П.И. Лапин. М., 1975. 27 с.

Methods of Phenological Observations in the Botanical Gardens of the USSR. Compiled by P.I. Lapin. Moscow, 1975. 27 p. (In Russ.).

16. Мурзабулатова Ф.К., Полякова Н.В. Опыт интродукции видов рода *Catalpa* Scop. в ботаническом саду г. Уфы // Изв. СамНЦ РАН. 2015. Т. 17, № 4. С. 245–247.

Murzabulatova F.K., Polyakova N.V. Experience of Introduction of Species of the Genus *Catalpa* Scop. in Ufa Botanical Garden. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 245–247. (In Russ.).

17. Ревяко И.И., Манченко В.С., Ревяко Е.И. Декоративность *Aësculus hippocástanum* в условиях урболандшафта «Новочеркасск» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 52–62.

Revyako I.I., Manchenko V.S., Revyako E.I. Decorative Effect of *Aësculus hippocástanum* under the Conditions of Novocherkassk Urban Landscape. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 1, pp. 52–62. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.52>

18. Сапелин А.Ю. Редкие виды древесных растений, встречающиеся в озеленении г. Москвы // Лесн. вестн. 2021. Т. 25, № 2. С. 73–80.

Sapelin A.Yu. Rare Species of Woody Plants in Moscow Landscaping. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 73–80. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-73-80>

19. Славский В.А., Николаев Е.А., Тимащук Д.А. Оценочные критерии качества плодов ореха грецкого в Центральном Черноземье // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 4. С. 58–66.

Slavskiy V.A., Nikolaev E.A., Timashchuk D.A. Estimated Criteria of Quality of Fruits Walnut in the Central Chernozem Region. *Forestry Engineering Journal*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 58–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/17403>

20. Сорокопудова О.А., Артюхова А.В. Декоративные деревья и кустарники коллекции ВСТИСП // Hortus botanicus. 2017. Т. 12. С. 752–760.

Sorokopudova O.A., Artiukhova A.V. Ornamental Trees and Shrubs of the ARHIBAN Collection. *Hortus botanicus*, 2017, vol. 12, pp. 752–760. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15393/j4.art.2017.4223>

21. Стурман В.И., Малькова И.Л., Загребина Т.А. Климат города. Основные параметры // Воздушный бассейн Ижевска. М.; Ижевск, 2002. С. 16–23.

Sturman V.I., Mal'kova I.L., Zagrebina T.A. City Climate: Key Parameters. *Air Basin of Izhevsk*. Moscow, Izhevsk, 2002, pp. 16–23. (In Russ.).

22. Фирсов Г.А., Васильев Н.П. Орех грецкий (*Juglans regia* L., Juglandaceae) в Ботаническом саду Петра Великого в Санкт-Петербурге // Вестн. Волгоградск. гос. ун-та. Сер. 11: Естеств. науки. 2015. № 3(13). С. 8–17.

Firsov G.A., Vasilyev N.P. *Juglans regia* L. (Juglandaceae) at Peter the Great Botanical Garden in Saint Petersburg. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya II. Estestvennyye nauki* = Natural Systems and Resources, 2015, vol. 3, no. 13, pp. 8–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2015.3.1>

23. Хоменок М.А. Изменчивость конского каштана обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) как основа для отбора декоративных форм в городских условиях Брянской области: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск, 2017. 22 с.

Khomenok M.A. *Variability of Horse Chestnut (Aesculus hippocastanum L.) as a Basis for Selecting of Ornamental Forms in Urban Environment of the Bryansk Region*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Bryansk, 2017. 22 p. (In Russ.).

24. Хуснутдинова С.Р., Дембич А.А., Закирова Ю.А. Социально-экологические факторы формирования комфортной среды урбанизированных территорий // Географич. вестн. 2016. № 4(39). С. 28–35.

Khusnutdinova S.R., Dembich A.A., Zakirova Yu.A. Socio-Ecological factors of the Comfortable Environment Formation in Urban Areas. *Geographical Bulletin*, 2016, no. 4(39), pp. 28–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-4-28-35>

25. Carlier J., Moran J. Hedgerow Typology and Condition Analysis to Inform Greenway Design in Rural Landscapes. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 247, pp. 790–803. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.116>

26. Cosmulescu S., Botu M., Achim G. Determination of Apomictic Fruit Set Ratio in Several Romanian Walnut (*Juglans regia* L.) Cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2012, vol. 40, no. 1, pp. 229–233. <https://doi.org/10.15835/nbha4016407>

27. Kukharska M. The Annual Cycle of Some Species of the *Catalpa* Scop. Genus in Conditions of Kyiv. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2014, vol. 6, no. 48. 19 p. (In Ukr.).

28. Laiko R.E. Apomixis of Walnut. *Acta Horticulturae.*, 1990, vol. 284, pp. 233–236. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1990.284.31>

29. Lazarev S.E., Semenyutina A.V. Features of Growth and Development of Representatives the Generic Complex of *Robinia* L. in Conditions of Introduction. *World Ecology Journal*, 2019, vol. 8, iss. 3. <https://doi.org/10.25726/NM.2019.85.96.003>

30. Solar A., Ivancic A., Stampar F., Hudina M. Genetic Resources of Walnut (*J. regia* L.) Improvement in Slovenia: Evaluation of the Largest Collection of Local Genotypes. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2002, vol. 49(5), pp. 491–501.

31. Semenyutina A.V., Klimov A.D. Analysis of Bioresources of the Gene Pool of *Robinia*, *Gleditsia* for Forest Meliorative Complexes on the Basis of Studying Adaptation to Stress Factors. *World Ecology Journal*, 2018, vol. 8, iss. 2, pp. 33–45. <https://doi.org/10.25726/NM.2018.2.2.004>

32. Тыapkina A.P., Silaeva Zh.G., Kiseleva L.L., Shiryayeva N.A., Parakhina E.A. Ecological Characteristics of Horse Chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) Plantings of the City of Orel. *BIO Web of Conferences, ITIA*, 2022, vol. 47, art. 11001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224711001>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares no conflict of interest

Научная статья

УДК 631.524.6:582.475.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-123-132

Пигментный комплекс ассимиляционного аппарата интродуцентов в Вологодской области

А.А. Карбасников¹, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [JXM-3724-2024](https://orcid.org/0009-0001-9739-3562),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9739-3562>

Е.Б. Карбасникова^{1✉}, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAH-6250-2021](https://orcid.org/0000-0003-2850-9362),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2850-9362>

О.С. Залывская², д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAV-4901-2020](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, г. Вологда, Россия; alex-karbon@yandex.ru, helen15@yandex.ru✉

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; o.zalyvskaya@narfu.ru

Поступила в редакцию 08.04.25 / Одобрена после рецензирования 04.07.25 / Принята к печати 05.07.25

Аннотация. Фотосинтез является одним из самых чувствительных к изменению факторов среды процессов. Древесные растения, выращиваемые вне их природных ареалов, испытывают интродукционный стресс. Аклиматизация интродуцентов сопровождается для них структурными и физиолого-биохимическими изменениями, которые обеспечивают возможность прохождения фотосинтеза в нетипичных условиях. Главными фоторецепторами являются хлорофиллы и каротиноиды, а их количественный и качественный составы выступают как надежные диагностические признаки состояния интродуцентов в новой среде. Цель исследования заключается в установлении изменений в пигментном комплексе ассимиляционного аппарата хвойных деревьев североамериканской флоры при интродукции в бореальную зону Европейского Севера. Объектами исследования стали популяции интродуцентов *Picea pungens* Engelm., *Pinus contorta* Douglas ex Loudon. и *Thuja occidentalis* L., произрастающие в дендрологическом саду Вологодской государственной молочнохозяйственной академии. Территория дендрологического сада расположена в типичном умеренно континентальном климате, характеризующемся неустойчивым режимом погоды. Показано, что содержание и хлорофиллов, и каротиноидов находится в границах оптимальных значений. У интродуцентов отмечено снижение количества фотосинтетических пигментов по сравнению с местными видами. Сумма пигментов изменяется от 1,35 до 1,81 мг/г сырого веса. Отношение содержания фотосинтетических пигментов у интродуцированных растений стремится к условной физиологической норме. Наиболее близки к оптимальным показатели *Picea pungens* и *Thuja occidentalis*. У остальных изучаемых видов растений отклонение составляет не более 6 %, что способствует успешной адаптации к новым экологическим условиям. Для всех проанализированных пород соотношение хлорофиллов не превышает оптимальных значений, что свидетельствует о прохождении адаптации и минимальности интродукционного стресса. Полученные результаты подтверждают пластичность фотосинтетического аппарата североамериканской дендрофлоры и ее способность приспосабливаться к экологическим условиям бореальной зоны, что делает возможным дальнейшее культивирование вида в условиях Европейского Севера.



Ключевые слова: фотосинтез, пигменты, ассимиляция, адаптация, интродукционный стресс, фотосистема, *Picea pungens* Engelm., *Pinus contorta* Douglas ex Loudon., *Thuja occidentalis* L., Вологодская область

Для цитирования: Карбасников А.А., Карбасникова Е.Б., Залывская О.С. Пигментный комплекс ассимиляционного аппарата интродуцентов в Вологодской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 123–132. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-123-132>

Original article

The Pigment Complex of the Assimilation Apparatus of Introduced Species in the Vologda Region

*Aleksandr A. Karbasnikov*¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [JXM-3724-2024](https://orcid.org/0009-0001-9739-3562), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9739-3562>

Elena B. Karbasnikova^{1✉}, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAH-6250-2021](https://orcid.org/0000-0003-2850-9362), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2850-9362>

*Olga S. Zalyvskaya*², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAV-4901-2020](https://orcid.org/0000-0002-7520-6295), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

¹Vologda State Dairy Farming Academy named after V.N. Vereshchagin, Vologda, Russia; alex-karbon@yandex.ru, helen15@yandex.ru✉

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; o.zalyvskaya@narfu.ru

Received on April 8, 2025 / Approved after reviewing on July 4, 2025 / Accepted on July 5, 2025

Abstract. Photosynthesis is one of the processes most sensitive to changes in environmental factors. Woody plants cultivated outside their natural ranges experience introduction stress. The acclimatization of introduced species is associated with structural, physiological and biochemical changes that ensure the possibility of photosynthesis under abnormal environmental conditions. The primary photoreceptors are chlorophylls and carotenoids, and their quantitative and qualitative compositions serve as a reliable diagnostic marker of the state of introduced species in a new environment. The study aims at detecting changes in the pigment complex of the photosynthetic apparatus of coniferous trees native to North America following their introduction into the boreal zone of Northern Europe. The study focused on populations of the introduced species *Picea pungens* Engelm., *Pinus contorta* Douglas ex Loudon, and *Thuja occidentalis* L. growing in the arboretum of the Vologda State Dairy Farming Academy named after V.N. Vereshchagin. The arboretum is located in a region with a typical moderate continental climate, with unstable weather patterns. The research results have shown that the levels of both chlorophylls and carotenoids fall within the optimal range. Introduced species were found to have lower levels of photosynthetic pigments compared to native species. The pigment content ranges from 1.35 to 1.81 mg/g of fresh weight. The ratio of photosynthetic pigments in introduced plants tends toward a conventional physiological norm. The values for *Picea pungens* and *Thuja occidentalis* are the closest to optimal. Among the other plant species studied, the deviation does not exceed 6 %, which contributes to their successful adaptation to new environmental conditions. The chlorophyll ratio for all the analyzed species does not exceed optimal values, which indicates adaptation occurrence and minimal introduction stress. The results

confirm the adaptability of the photosynthetic apparatus of North American tree species and their ability to adapt to the ecological conditions of the boreal zone, making it possible to grow these species in the European North.

Keywords: photosynthesis, pigments, assimilation, adaptation, introduction stress, photosystem, *Picea pungens* Engelm., *Pinus contorta* Douglas ex Loudon., *Thuja occidentalis* L., Vologda region

For citation: Karbasnikov A.A., Karbasnikova E.B., Zalyvskaya O.S. The Pigment Complex of the Assimilation Apparatus of Introduced Species in the Vologda Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 123–132. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-123-132>

Введение

Фотосинтез чрезвычайно чувствительный к внешним воздействиям процесс, происходящий в растительных клетках. На него особенно влияют инсоляционный и температурный режимы, обеспеченность влагой, плодородие почв, уровень загрязнения и т. д. От состояния фотосинтетического аппарата растений в конечном итоге зависит эффективность ассимиляции ими углекислого газа.

Древесные растения, выращиваемые вне природных ареалов, испытывают интродукционный стресс, который отражается на многих процессах жизнедеятельности таких растений. Прохождение адаптации в новых природно-климатических условиях обеспечивает для них возможность развития и роста. В ходе акклиматизации интродуцированных видов наблюдаются структурные и биохимические модификации, обеспечивающие оптимальное функционирование фотосинтетического аппарата. Это в значительной мере определяется уровнем морфофизиологической пластичности фотосинтетического аппарата [1, 4, 5, 8, 19, 21].

Эффективность работы фотосинтетических пигментов во многом зависит от соответствия их состава экологическим условиям роста и развития. Фотосинтетическая активность может снижаться в результате изменения оптических свойств хвои и нарушения теплового баланса [1, 4, 19, 21]. Трансформация данного физиологического процесса является ответной реакцией растения на интродукционный и антропогенный стресс.

Главными фоторецепторами являются хлорофиллы и каротиноиды, а их количественный и качественный составы выступают в качестве надежного диагностического признака состояния интродуцентов в новой среде. Лучший индикатор благоприятности природных условий для интродуцента – соответствие его пигментного аппарата пигментному аппарату аборигенных видов [8, 13, 18].

Анализ публикаций [2, 3, 6, 9, 12, 15] свидетельствует о высоком внимании ученых к интродуцентам североамериканской дендрофлоры, которая представляет интерес для различных хозяйственных сфер человека. Этому способствует их экологическая пластичность, устойчивость к неблагоприятным климатическим условиям, вредителям и болезням, распространенным у растений Европейского Севера России.

Высокий полиморфизм ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) и туи западной (*Thuja occidentalis* L.) позволяет широко использовать эти виды в озеленении. Кроме того, они имеют высокую толерантность к поллютантам, в отличие

от многих местных пород, особенно хвойных. Они универсальны в использовании в насаждениях северных городов [4, 12].

Сосна скрученная (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon.) имеет большую скорость роста как в высоту, так и по диаметру ствола. Ее древесина может выступать в качестве сырья для целлюлозно-бумажной промышленности и рекомендована рядом исследователей для плантационного выращивания [6].

Цель исследования заключается в установлении изменений пигментного комплекса ассимиляционного аппарата хвойных деревьев североамериканской флоры при интродукции в бореальную зону Европейского Севера.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено в дендрологическом саду Вологодской государственной молочнохозяйственной академии, на территории которого произрастают популяции интродуцентов ели колючей, сосны скрученной и туи западной (табл. 1). Деревья сохранили габитус, присущий им в условиях естественного ареала, достигли возраста плодоношения, имеют ежегодные приросты. В качестве контроля выбраны аборигенные виды: ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H.Karst) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), произрастающие на том же объекте.

Таблица 1

Средние биометрические показатели исследуемых популяций
Average biometric parameters of the studied populations

Вид	Возраст, лет	Диаметр		Высота, м
		ствола, см	кроны, м	
Ель обыкновенная	25	19	6,5	15,5
Ель колючая	16	9	3,0	3,7
Сосна обыкновенная	24	24	7,5	14,8
Сосна скрученная	22	22	6,6	13,8
Туя западная	24	17	3,0	6,3

Дендрологический сад расположен в типичном умеренно континентальном климате, характеризующемся неустойчивым режимом погоды. Средняя температура января составляет $-11,5^{\circ}\text{C}$, июля $-16,9^{\circ}\text{C}$. Основными лимитирующими факторами являются низкие температуры зимнего периода (в январе и декабре температура может опускаться ниже -40°C) и их резкие перепады (до 15°C), короткий вегетационный сезон, незначительная продолжительность светового дня, которая в конце декабря–начале января составляет менее 6 ч, а также низкое почвенное плодородие (преобладают подзолистые почвы).

На 15 модельных деревьях каждой древесной породы в средней части кроны отбирали 2-летнюю хвою в 15 повторностях. Сразу после сбора хвои проводили лабораторные исследования. Отбор образцов осуществляли в начале июля. Экстракт получали экстракцией 1 г хвои этиловым спиртом. Оптическую плотность определяли с помощью фотоэлектроколориметра. Предварительно строили калибровочную кривую на основе серий стандартных растворов. Измерение концентрации хлорофиллов проводили с использованием красного светофильтра. Содержание пигментов рассчитывали по формулам:

$$C_a = 13,6A_{665} - 5,76A_{649};$$

$$C_b = 25,8A_{649} - 7,6A_{665};$$

$$C_{кар} = 4,695A_{440} - 0,268 (C_a + C_b),$$

где C_a , C_b , $C_{кар}$ – концентрации хлорофилла a , хлорофилла b и каротиноидов соответственно, мг/л; A – экспериментальные значения оптической плотности, измеренные при соответствующих длинах волн (665, 649 и 440 нм).

После установления концентрации пигмента рассчитывали его количество в образце [1, 13, 14, 19, 20]. Для обработки данных методом описательной статистики использовали пакет программ Microsoft Office Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Одним из критериев функционирования ассимиляционного аппарата и воздействия на него факторов окружающей среды служит количественное содержание фотосинтетических пигментов в хвое.

Реакционные центры и светособирающие комплексы высших растений содержат хлорофиллы a и b , способные поглощать солнечное излучение с различными длинами волн [14]. Ключевую роль в преобразовании световой энергии в химическую играет хлорофилл a . Хлорофилл b выполняет вспомогательную функцию, собирая энергию и передавая ее хлорофиллу a . Содержание хлорофилла b оказывает влияние на скорость роста и накопление биомассы растения. Недостаточное количество данного пигмента может приводить к замедлению процессов цветения [7, 22]. Нормой является уровень хлорофиллов в границах 0,5–3,0 мг/г сырого веса.

Каротиноиды выполняют роль фотопротекторных агентов, предохраняя молекулы хлорофилла от фотоокислительного повреждения и способствуя рассеиванию избыточной энергии, поглощаемой молекулами хлорофилла [16]. Каротиноидов в растении должно быть 0,1–0,5 мг/г сырого веса [11, 16]. Количественный состав пигментов в фотосинтетическом аппарате хвойных видов, культивируемых в дендрологическом саду Вологодской государственной молочнохозяйственной академии, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Содержание пигментов (мг/г сырого веса) в фотосинтетическом аппарате исследуемых видов
Pigment content (mg/g fresh weight) in the photosynthetic apparatus of the studied species

Вид	Хлорофилл		Каротиноиды	Сумма
	a	b		
Ель обыкновенная	0,88±0,028	0,49±0,012	0,35±0,017	1,72±0,038
Ель колючая	0,85±0,027	0,37±0,023	0,28±0,011	1,50±0,036
Сосна обыкновенная	0,93±0,026	0,47±0,018	0,36±0,012	1,76±0,039
Сосна скрученная	0,74±0,028	0,32±0,068	0,29±0,018	1,35±0,058
Туя западная	0,82±0,028	0,45±0,028	0,34±0,013	1,61±0,052

В целом содержание и хлорофиллов и каротиноидов находится в границах оптимума. У интродуцентов отмечено снижение количества фотосинтетических пигментов, что может свидетельствовать о некотором подавлении фотосинтеза. Самые высокие показатели получены для аборигенных видов.

Уровень статистической значимости приведенных результатов $p \leq 0,05$, что подтверждает достоверность данных.

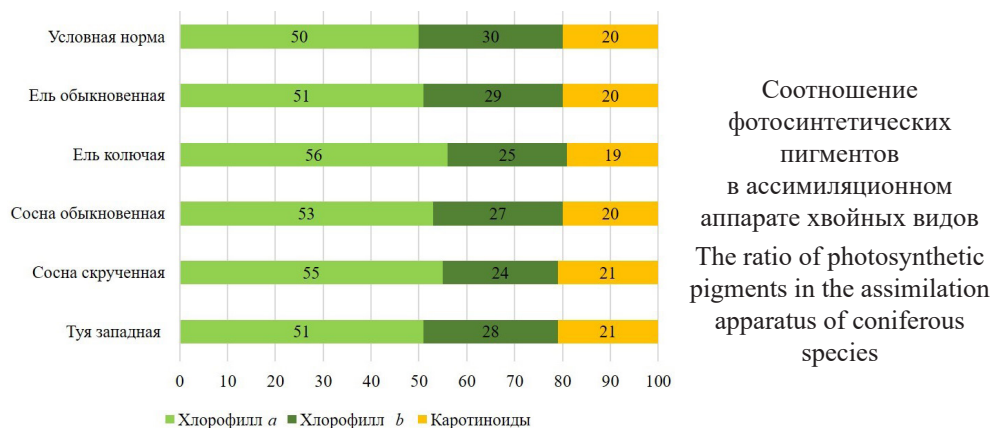
При сравнении ели колючей и ели обыкновенной наименьшей разницей характеризуется содержание хлорофилла *a* – 3,5 %; количество хлорофилла *b* и каротиноидов отличается значительно больше – 24 и 20 % соответственно. Сумма хлорофиллов и каротиноидов у ели колючей меньше на 12 %.

При сравнении результатов анализа пигментного состава хвои сосны обыкновенной и сосны скрученной также отмечается различное содержание пигментов. Больше всего несходство прослеживается в содержании хлорофилла *b* и составляет 32 %; хлорофилла *a* и каротиноидов у сосны скрученной на 20 % меньше, чем у сосны обыкновенной. Сосна является светолюбивой древесной породой, и уменьшение количества хлорофилла *a* может существенно повлиять на ее развитие. Сумма пигментов у сосны скрученной ниже на 25 % по сравнению с аборигенным видом. Это самое большое снижение показателя среди исследуемых растений.

В бореальной флоре нет представителя рода туи западной, поэтому ее мы сравнивали с обоими местными видами. Больше всего количественный состав пигментов данной породы соответствует ели обыкновенной, что связано с ее отношением к свету. Содержание хлорофиллов и каротиноидов различается незначительно – менее чем на 10 %. В сопоставлении с сосной обыкновенной наибольшая разница в содержании хлорофилла *a* – 15 %, что объясняется теневыносливостью вида. Содержание хлорофилла *b* ниже на 6 %, каротиноидов – выше на 6 %.

Количественное содержание пигментов не является фактором, лимитирующим фотосинтез. Их состав может претерпевать изменения в зависимости от факторов внешней среды и особенностей вида растения. На показатели также могут повлиять сроки сбора материала.

Для эффективного фотосинтеза существенное значение имеет соотношение фотосинтетических пигментов. Оно зависит от абиотических факторов среды, в значительной мере от освещенности [5, 7, 8]. Оптимальным является соотношение 50 % хлорофилл *a* + 30 % хлорофилл *b* + 20 % каротиноиды [8, 10]. Способность древесных растений изменять уровень пигментов для осуществления фотосинтеза в новых для них условиях свидетельствует о пластичности фотосинтетического аппарата. Относительное содержание фотосинтетических пигментов в ассимиляционной системе исследуемой дендрофлоры представлено на рисунке.



Результаты анализа указывают на то, что соотношение фотосинтетических пигментов у аборигенных видов и интродуцентов приближается к условной норме. Наиболее близкими к нормативным показателям являются значения для ели обыкновенной и туи западной. У остальных видов отклонение составляет не более 6 %, что позволяет поддерживать высокую продуктивность фотосинтеза и способствует их успешной адаптации к новым экологическим условиям.

При интродукционном стрессе особенно значимы каротиноиды. Они способны стабилизировать мембраны хлоропластов и белки антенных комплексов, тем самым выполняя защитные функции. В связи с этим важно поддержание нормального уровня каротиноидов в составе пигментного комплекса. Уровень каротиноидов у исследуемых видов соответствует оптимальному. У аборигенных видов он совпадает с нормой, тогда как у интродуцентов различие составляет около 1 %.

Влияние факторов внешней среды на состояние ассимиляционного аппарата в большей степени можно оценить по так называемому показателю стресса, который определяется соотношением хлорофиллов *a* и *b* [10, 11]. Это отношение характеризует активность хлорофилла *a*, и чем больше значение, там интенсивнее фотосинтез. Обычные для зеленых листьев значения данного показателя составляют 2,5–3,0 [11, 17]. Соотношение хлорофиллов очень изменчиво и зависит от интенсивности освещенности растения – чем она выше, тем больше значение.

Отношение суммы хлорофиллов *a+b* и каротиноидов – более информативный показатель жизненного состояния растений. В нормальных зеленых листьях эти значения находятся в пределах от 3 до 8 [9, 11] (табл. 3).

Таблица 3

Соотношение фотосинтетических пигментов исследуемых видов
The ratio of photosynthetic pigments in the studied species

Вид	Хлорофиллы <i>a</i> и <i>b</i>	Хлорофилл <i>a+b</i> и каротиноиды
Ель обыкновенная	1,8±0,1	3,9±0,3
Ель колючая	2,3±0,3	4,4±0,4
Сосна обыкновенная	2,0±0,2	3,9±0,3
Сосна скрученная	2,3±0,3	3,6±0,3
Туя западная	1,8±0,1	3,7±0,2

Соотношение содержания пигментов хлорофиллов *a* и *b* наименьшее у ели обыкновенной и туи западной (1,8). Для теневыносливых видов такое значение не является критичным, а может считаться особенностью фотосистемы. Учитывая оптимальность соотношения пигментов, можно считать, что фотосинтез идет у этих видов эффективно. Ни для одной исследуемой породы соотношение хлорофиллов не превышает верхнюю границу нормы, это свидетельствует о прохождении адаптации и минимальности интродукционного стресса.

Приспособленность фотосинтетического аппарата к условиям Европейского Севера подтверждается и отношением суммы зеленых пигментов к желтым. Показатель близок к нижней границе нормы. Наибольшее значение получено для ели колючей.

Заключение

Результаты исследования показали, что в условиях дендрологического сада Вологодской государственной молочнохозяйственной академии соотношения фотосинтетических пигментов у аборигенных видов и интродуцентов приближаются к условно установленным оптимальным значениям.

Это подтверждает, что даже в условиях интродукционного стресса основные механизмы фотосинтеза сохраняются, обеспечивая необходимую продуктивность растений и помогая им адаптироваться к новым условиям среды. Особенно важным показателем является соотношение хлорофиллов *a* и *b*, которое отражает протекание фотосинтеза и может служить индикатором стресса. Установлено, что это соотношение не превышает верхней границы нормы, что свидетельствует о минимальной степени интродукционного стресса.

Исследуемые виды североамериканской дендрофлоры характеризуются широким спектром экологической толерантности. Благодаря пластичности фотосинтетического аппарата сосна скрученная, ель колючая и туя западная способны обеспечивать при интродукции достаточный уровень фотосинтетической активности.

Полученные результаты подтверждают способность изучаемых североамериканских видов успешно адаптироваться к экологическим условиям бореальной зоны, что делает возможным их дальнейшее культивирование в условиях Европейского Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аганина Ю.Е., Тарханов С.Н. Изменчивость биохимических показателей и адаптация краснопыльниковой и желтопыльниковой форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) в условиях избыточного увлажнения // Изв. СамНЦ РАН. 2016. Т. 18, № 2. С. 10–14.

Aganina Yu.E., Tarkhnov S.N. Variability of Biochemical Indicators and Adaptation of f. (var.) *erythranthera* Sanio and f. (var.) *sulfuranthera* Kozubow Forms of the Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Conditions of Excess Humidification. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 10–14. (In Russ.).

2. Бабина С.З., Сродных Т.Б., Нагитмов З.Я. Перспективность использования на Среднем Урале декоративных сортов ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 2. С. 57–66.

Babina S.Z., Srodnykh T.B., Nagitmov Z.Ya. The Prospects of Using Decorative Varieties of Prickly Spruce (*Picea pungens* Engelm.) in the Middle Urals. *Forests of Russia and economy in them*, 2023, no. 2, pp. 57–66. (In Russ.).

<https://doi.org/10.51318/FRET.2023.75.12.007>

3. Бабич Н.А., Андропова М.М. Сосна скрученная – перспективный интродуцент для озеленения малых северных городов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 155–160.

Babich N.A., Andronova M.M. Lodgepole Pine – a Perspective Introduced Species for Greening of Northern Smaller Cities. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 6, pp. 155–160. (In Russ.).

4. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Котынова М.Ю. Сезонный характер содержания пигментов в хвое туи западной в условиях Нижегородской области // Тр. С.-Петербурга. науч.-исследоват. ин-та лесн. хоз-ва. 2022. № 3. С. 38–58.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kotynova M.Y. Seasonal Character of the Pigment Content in the Needles of Northern White-Cedar in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2022, no. 3, pp. 38–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.3.38>

5. Дымова О.В., Головки Т.К. Фотосинтетические пигменты в растениях природной флоры таежной зоны европейского северо-востока России // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 3. С. 198–206.

Dymova O.V., Golovko T.K. Photosynthetic Pigments in Native Plants of the Taiga Zone at the European Northeast Russia. *Fiziologiya rastenii* = Russian Journal of Plant Physiology, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 198–206. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330319030035>

6. Корчагов С.А., Грибов С.Е., Хамитов Р.С. Опыт выращивания сосны скрученной (*Pinus contorta*) в Вологодской области // Лесн. вестн. 2020. Т. 24, № 3. С. 60–65.

Korchagov S.A., Gribov S.E., Khamitov R.S. Pine Shore (*Pinus contorta*) Growing Experiment in Vologda Region. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 60–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-60-65>

7. Кулькова А.В., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Сезонные изменения пигментного состава хвои представителей рода ель в Нижегородской области // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2021. Вып. 235. С. 22–39.

Kulkova A.V., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. Seasonal Changes in the Pigment Composition of Needles of Representatives of the Genus Spruce in the Nizhny Novgorod Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 22–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.22-39>

8. Маракеев О.А. Экологическая физиология растений: фотосинтез и свет: текст лекций. Ярославль: Ярославск. гос. ун-т, 2005. 95 с.

Marakaev O.A. *Ecological Plant Physiology: Photosynthesis and Light: Lectures*. Yaroslavl, Yaroslavl State University Publ., 2005. 95 p. (In Russ.).

9. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С., Зубкова Е.К., Шерстнева О.А., Тютерева Е.В. Фотосинтез и пигменты пластид вечнозеленых растений-интродуцентов (хвойных и покрытосеменных) в годичном цикле в связи с проблемой зимостойкости // Ботаника: история, теория, практика: тр. Междунар. науч. конф. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. С. 131–135.

Maslova T.G., Mamushina N.S., Zubkova E.K., Sherstneva O.A., Tyutereva E.V. Photosynthesis and Plastid Pigments of Introduced Evergreen Plants (Conifers and Angiosperms) in the Annual Cycle Due to the Issue of Winter Hardiness. *Botany: History, Theory, Practice: Proceedings of the International Scientific Conference*. Saint Petersburg, SPbEU «LETI» Publ., 2014, pp. 131–135. (In Russ.).

10. Мокроносов А.Т., Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. М.: Академия, 2006. 445 с.

Mokronosov A.T., Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. *Photosynthesis. Physiological, Ecological and Biochemical Perspectives*. Moscow, Academia Publ., 2006. 445 p. (In Russ.).

11. Пигменты пластид зеленых растений и методика их исследования / под ред. Н.В. Баженовой, Т.Г. Масловой, И.А. Поповой, О.Ф. Поповой, Д.И. Сапожникова, З.М. Эйдельман. М.; Л.: Наука, 1964. 123 с.

Plastid Pigments of Green Plants and Methods for Their Study. Ed. by N.V. Bazhenova, T.G. Maslova, I.A. Popova, O.F. Popova, D.I. Sapozhnikov, and Z.M. Eidelman. Moscow, Nauka Publ., 1964. 123 p. (In Russ.).

12. Сарбаева Е.В. Биологические особенности туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в условиях городской среды: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2005. 22 с.

Sarbaeva E.V. *Biological Features of the White Cedar (Thuja occidentalis L.) in an Urban Environment*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Nizhny Novgorod, 2005. 22 p. (In Russ.).

13. Саяткина М.Ю. Анализ особенностей пигментного комплекса листьев ясеня обыкновенного лесостепной зоны // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2022. Т. 4-1(67). С. 22–24.

Sautkina M.Yu. Analysis of the Features of the Pigment Complex of the Leaves of the Common Ash in the Forest-Steppe Zone. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2022, vol. 4-1(67), pp. 22–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-4-1-22-24>

14. Титова М.С. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. на загрязнение окружающей среды // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10. С. 122–126.

Titova M.S. Pine (*Pinus sylvestris* L.) Pigmental System Reaction on the Environmental Pollution. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KSAU, 2013, no. 10, pp. 122–126. (In Russ.).

15. Тишкина Е.А., Абрамова Л.П. Состояние фотосинтетических пигментов в интродукционных популяциях можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) // Изв. ОГАУ. 2018. № 2(70). С. 83–87.

Tishkina Ye.A., Abramova L.P. The Condition of Photosynthetic Pigments in the Introduction Populations of Common Juniper (*Juniperus communis* L.). *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2018, no. 2(70), pp. 83–87. (In Russ.).

16. Тютерева Е.В., Дмитриева В.А., Войцеховская О.В. Хлорофилл *b* как источник сигналов, регулирующих развитие и продуктивность растений // С.-х. биол. 2017. Т. 52, № 5. С. 843–855.

Tyutereva E.V., Dmitrieva V.A., Voitsekhovskaja O.V. Chlorophyll *b* as a Source of Signals Steering Plant Development (Review). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* = Agricultural Biology, 2017, vol. 52, no. 5, pp. 843–855. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.5.843rus>

17. Ягодин В.И., Холькина Ю.И. Основы химии и технологии переработки древесной зелени. Л.: Ленингр. ун-т, 1981. 224 с.

Yagodin V.I., Kholkina Y.I. *Fundamentals of Chemistry and Technology of Wood Green Waste Processing*. Leningrad, Leningrad University Publ., 1981. 224 p. (In Russ.).

18. Katahata S., Naramoto M., Kakubari Y., Mukai Y. Photosynthetic Acclimation to Dynamic Changes in Environmental Conditions Associated with Deciduous Overstory Phenology in *Daphniphyllum humile*, an evergreen Understory Shrub. *Tree Physiology*, 2005, vol. 25, iss. 4, pp. 437–445. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.4.437>

19. Li Y., He N., Hou J., Xu L., Liu C., Zhang J., et al. Factors Influencing Leaf Chlorophyll Content in Natural Forests at the Biome Scale. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2018, vol. 6, art. 64. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>

20. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of Total Carotenoids and Chlorophylls *a* and *b* of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, vol. 11, iss. 5, pp. 591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>

21. Sautkina M.Yu. Comparative Assessment of the Quantitative Content of the Main Photosynthetic Pigments in the Leaves of the English Oak of the Field–Protective Forest Strips. *Journal of Agriculture and Environment*, 2022, vol. 1(21), pp. 1–4. <https://doi.org/10.23649/jae.2022.1.21.18>

22. Voitsekhovskaja O.V., Tyutereva E.V. Chlorophyll *b* in Angiosperms: Functions in Photosynthesis, Signaling and Ontogenetic Regulation. *Journal of Plant Physiology*, 2015, vol. 189, pp. 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.09.013>

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



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-133-144

Пенетрационная характеристика грунтозацепов мобильных лесосплавных опор

С.В. Посыпанов¹, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

К.В. Козлов¹, *аспирант*; ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

С.П. Карпачев², *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; s.posypanov@narfu.ru, kozlovkonstantin94@gmail.com

²Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия; karpachevs@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.25 / Одобрена после рецензирования 14.12.25 / Принята к печати 19.12.25

Аннотация. Мобильные наполняемые опоры для крепления лесосплавных объектов соответствуют требованиям, предъявляемым к устройствам, способствующим реализации концепции эффективной, экологически щадящей транспортировки лесоматериалов по малым и средним рекам. Надежная работа указанных опор предполагается при полном погружении вертикальных элементов грунтозацепов в грунт. Для обеспечения такого погружения необходима информация об усилиях, которые следует прилагать в этом случае. Цель исследования – обеспечение надежной работы мобильных наполняемых опор с грунтозацепами. Метод исследования – теоретико-экспериментальный. Получены аналитические зависимости для усилий вдавливания секций грунтозацепов. С их помощью установлены факторы, определяющие выходные величины, характер и степень влияния этих факторов. Выполнение расчетов по этим зависимостям не позволяет получить достоверные результаты, т. к. напряжения в грунте, возникающие под нижними краями и на боковых поверхностях грунтозацепов при рассматриваемых глубинах неизвестны. Установлено, что усилие, требуемое для вдавливания секции грунтозацепов в грунт, зависит от тех же характеристик грунта, что и количество ударов динамического плотномера для погружения его наконечника на требуемую глубину и удельное сопротивление пенетрации, измеряемое пенетрометром. При лабораторных экспериментах, базирующихся на выполненных теоретических исследованиях, убедились, что между 3 указанными величинами есть явно выраженная связь. С учетом этой связи проведены экспериментальные исследования в натурных условиях. Получены аппроксимирующие зависимости усилий для вдавливания рекомендованных секций грунтозацепов от среднего количества ударов динамического плотномера и удельного сопротивления пенетрации. Для ряда грунтов указаны значения рассматриваемых усилий с ориентацией на максимальные величины, зафиксированные при экспериментах.

Приведенные аппроксимирующие зависимости и значения усилий позволят наиболее эффективно решать вопросы, связанные с обеспечением погружения грунтозацепов в грунт и будут способствовать надежной работе рассматриваемых опор.

Ключевые слова: лесосплав, мобильная лесосплавная опора, грунтозацепы, усилие вдавливания, наплавные сооружения, крепление плотов

Для цитирования: Посыпанов С.В., Козлов К.В., Карпачев С.П. Пенетрационная характеристика грунтозацепов мобильных лесосплавных опор // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 133–144. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-133-144>

Original article

Penetration Properties of Ground Lugs of Portable Supports for Timber Rafting

Sergey V. Posypanov¹✉, *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Konstantin V. Kozlov¹, *Postgraduate Student*; ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Sergey P. Karpachev², *Doctor of Engineering, Prof.*; ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; s.posypanov@narfu.ru✉, kozlovkonstantin94@gmail.com

²Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia; karpachevs@mail.ru

Received on October 19, 2025 / Approved after reviewing on December 14, 2025 / Accepted on December 19, 2025

Abstract. Portable fillable supports for fastening timber rafting structures meet the requirements for devices that facilitate the implementation of a concept for the efficient and environmentally friendly transportation of timber along small and medium-sized rivers. Reliable operation of such supports is assumed when the vertical elements of the ground lugs are completely immersed into soil. In order to achieve this level of immersion, we need information about the effort required in this particular case. The research aims to ensure the reliable operation of portable fillable supports with ground lugs. We have used the theoretical and experimental research method. The results include analytical dependencies for the penetration forces of the ground lugs' sections. These factors allowed us to identify the variables that determine the output values, as well as the nature and extent of the factors' influence. Performing calculations based on these dependencies does not provide reliable results, since the ground stresses occurring beneath the lower edges and on the lateral surfaces of the ground lugs at the considered depths are unknown. We have found that the force required to drive the ground lug section into the soil depends on the same soil parameters as the number of blows required by the dynamic densimeter to drive its tip to the required depth and the specific penetration resistance measured by the penetrometer. Laboratory experiments, based on prior theoretical studies, confirmed that there is a clear relationship between the three parameters mentioned. In view of this relationship, experimental studies were carried out under field conditions. Approximate dependencies of the forces required to drive in the recommended sections of ground lugs were obtained based on the average number of blows from a dynamic densimeter

and the specific penetration resistance. The values of the considered forces for a number of soil types are given, based on the maximum values recorded during experiments. The approximate dependencies and force values provided here will enable the most effective resolution of issues related to ensuring the penetration of ground lugs into soil and will contribute to the reliable operation of the studied supports.

Keywords: timber rafting, portable timber rafting support, ground lugs, penetration force, floating structures, raft holding

For citation: Posypanov S.V., Kozlov K.V., Karpachev S.P. Penetration Properties of Ground Lugs of Portable Supports for Timber Rafting. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 133–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-133-144>

Введение

По мнению специалистов, проблема доставки древесного сырья из удаленных лесных массивов в наиболее крупных лесных регионах может быть решена посредством экологически щадящей лесотранспортной эксплуатации сети малых и средних рек. Разработана концепция решения этой проблемы, учитывающая непродолжительность периода навигации на указанных реках и, соответственно, краткосрочность периода эксплуатации используемых устройств [6]. В частности, согласно упомянутой концепции на рассматриваемых реках для крепления лесосплавных объектов наиболее целесообразно использование быстро устанавливаемых мобильных опор. Они должны быть простыми по конструкции, экономичными и надежными. Следует предусмотреть возможность их установки в местах, недоступных для транспорта и другой техники. Перечисленным требованиям соответствуют конструкции, состоящие из легких переносимых емкостей, наполняемых на месте водой или грунтом, размещенных на гибком несущем основании, снабженном секциями грунтозацепов. В качестве наполняемых емкостей могут быть использованы типовые резервуары [5, 10]. Можно также использовать емкости, имеющие гибкую оболочку [11, 12, 20]. Такие опоры разработаны авторами статьи [6, 10, 11].

Секции грунтозацепов, существенно повышающих держащую силу опор (примерно в 2 раза), размещены под емкостями продольными рядами. Фрагмент такого ряда приведен на рис. 1.



Рис. 1. Фрагмент ряда секций грунтозацепов из уголка 50×50×5 мм

Fig. 1. A fragment of a row of ground lug sections made of 50×50×5 mm angle bar

При разработке конструкции грунтозацепов, как и опоры в целом, стремились обеспечить их простоту, низкую стоимость, возможность изготовления в мастерских лесозаготовителей.

Попарное соединение грунтозацепов в секции позволяет исключить их выворачивание из грунта при приложении горизонтальной нагрузки.

Наиболее эффективная и надежная работа опоры предполагается при полном погружении вертикальных элементов грунтозацепов в грунт, в т. ч. в твердый, покрытый дерном, если предусматривается ее эксплуатация в таких условиях. Указанное погружение обеспечивается соответствующим соотношением вертикальной нагрузки, количества грунтозацепов и их размеров. Информации, позволяющей на этапе проектирования решить данную задачу для грунтозацепов рассматриваемой конструкции, не обнаружено. На основании изложенного был сделан вывод о необходимости выполнения рассматриваемого исследования.

Цель – обеспечение надежной работы мобильных наполняемых лесосплавных опор с грунтозацепами.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – грунтозацепы мобильных наполняемых лесосплавных опор. Метод – теоретико-экспериментальный.

На этапе теоретических исследований опирались на положения механики грунтов [13, 14, 16, 18] и сведения, полученные из работ [1, 7–9, 15, 19], посвященных погружению в грунт свай при устройстве сооружений различных конструкций.

При проведении экспериментального исследования по оценке усилий, требуемых для вдавливания секций грунтозацепов в грунт в лабораторных условиях была использована универсальная напольная испытательная машина AG-50kNX, Shimadzu, s/n: 133005002396, оснащенная нагрузочной ячейкой SFL-50KNAG, Shimadzu, s/n: p122107. Интервал измерения нагрузки – от 50 Н до 50 кН. Точность измерения – $\pm 0,5\%$ от усилия. Есть возможность изменения скорости перемещения траверсы в диапазоне 0,0005–1000 мм/мин.

При проведении опытов грунт размещали в пластиковом контейнере. Образцы грунтов, соответствующие размерам контейнера, были взяты из шурфов без нарушения структуры. Исключение составляли песчаные грунты, которые после засыпки в контейнер уплотнили до средней плотности сложения. Контейнер устанавливали на основание под перемещаемой траверсой (рис. 2).



Рис. 2. Вдавливание секции грунтозацепов в грунт испытательной машиной

Fig. 2. Penetration of the ground lug section into soil using the testing machine

Исследуемую секцию грунтозацепов укладывали на поверхность грунта. После этого с помощью испытательной машины осуществляли вдавливание секции грунтозацепов в грунт. Усилие на секцию передавалось через шток, имеющий в нижней части диск с плоской контактной поверхностью. Наличие этого диска обеспечивало равномерную нагрузку на грунтозацепы.

Управление испытательной машиной осуществлялось с рабочего места, оборудованного компьютером, на котором установлено специальное программное приложение. Используя это приложение, задавали основные параметры процесса, в частности скорость вдавливания, глубину вдавливания, единицы измерения и т. д.

Для определения абсолютного и удельного сопротивления пенетрации [2, 3] использован пенетрометр ПСГ-МГ4 (рис. 3), а также более простой прибор – динамический плотномер [4]. При помощи этого прибора, действуя по методике [4], определяли среднее количество ударов, необходимое для погружения его наконечника в грунт на глубину 10 см.



Рис. 3. Пенетрометр: *а* – общий вид; *б* – показания на мониторе

Fig. 3. Penetrometer: *a* – general view; *b* – readings on the monitor

При проведении натурных исследований на предварительно выбранной площадке делали замеры с помощью пенетрометра. Если полученные значения оказывались подходящими, то на этой же площадке выполняли соответствующие действия с динамическим плотномером. Далее определяли требуемые усилия вдавливания для секций грунтозацепов, выполненных из уголков 50×50×5 и 100×100×8 мм. Усилия вдавливания устанавливали в следующем порядке. Укладывали на поверхность грунта секцию грунтозацепов. На нее устанавливали емкость. Емкость постепенно заполняли водой или грунтом. После того как грунтозацепы вдавливались в грунт, заполнение прекращалось. Далее находили массу емкости с водой или грунтом. Зная массу, определяли вертикальную нагрузку, обеспечивающую вдавливание секции. Таким же образом устанавливали силу вдавливания для второй секции, после чего перемещались на следующую площадку с другим грунтом, где выполнялись аналогичные действия.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате теоретических исследований получили аналитические зависимости для усилий вдавливания секции грунтозацепов в сыпучие и глинистые грунты. В первом случае зависимость имеет вид

$$P = 2l(t\sigma_1 + 2fh\sigma_2), \quad (1)$$

во втором

$$P = 2l(t\sigma_1 + 2h(f\sigma_2 + c)), \quad (2)$$

где l – длина грунтозацепа, м; t – толщина вертикального элемента грунтозацепа, м; σ_1 , σ_2 – средние вертикальное в грунте под нижними краями грунтозацепов и нормальное на боковых поверхностях грунтозацепов напряжения соответственно, Па; f – коэффициент трения между грунтом и грунтозацепом; h – максимальная глубина вдавливания грунтозацепа, м; c – удельное сцепление грунта, Па.

Выражения (1), (2) наглядно демонстрируют, что зависимость усилия вдавливания от длины грунтозацепа является почти линейной. Очевидно, что с увеличением этой длины растет и рассматриваемая сила.

Не имея величин напряжений σ_1 и σ_2 для рассматриваемого случая, предварительно мы можем оценить лишь доли в общей силе вдавливания секций грунтозацепов, обуславливаемые нормальными вертикальными и горизонтальными напряжениями в грунте. При этом воспользовались расчетными сопротивлениями под основаниями строительных конструкций в грунте и на их боковых поверхностях [13]. Эти величины приводятся для значительно больших глубин, чем для существующих при вдавливании грунтозацепов. Однако соотношения между этими величинами на разных глубинах относительно стабильны. Указанные сопротивления под основаниями у песчаных грунтов в 55–140 раз больше, чем на боковых поверхностях, у глинистых – в 45–85 раз. При использовании в качестве грунтозацепов уголка из прокатной стали суммарная боковая площадь, по которой действуют силы трения, больше опорной в 20–25 раз. Сопоставление приведенных величин свидетельствует о том, что сопротивление вдавливанию по опорной площади превосходит значение для боковых поверхностей. То есть увеличение толщины грунтозацепа в большей степени будет способствовать росту сопротивления вдавливанию, чем увеличение высоты полки уголка. Кроме того, повышение толщины грунтозацепа предполагает большее уплотнение грунта по обе стороны от боковых поверхностей в процессе вдавливания, таким образом, толщина грунтозацепа сказывается и на сопротивлении вдавливанию по боковым поверхностям.

Сопротивление под основаниями на песчаных грунтах увеличивается с ростом крупности составляющих их фракций. Согласно [13], указанное сопротивление на гравелистых песках в 3–4 раза больше, чем на мелких. На глинистых грунтах оно увеличивается с уменьшением текучести. При изменении этого показателя от 0,6 до 0 расчетное сопротивление под основанием растет примерно в 12 раз. Сопротивления по боковой поверхности имеют аналогичную тенденцию. Однако она проявляется в меньшей степени. Это сопротивление у крупных песков примерно в 1,5 раза больше, чем у мелких. При изменении показателя текучести от 0,6 до 0 у глинистых грунтов оно увеличивается примерно в 4–5 раз. С повышением влажности грунта его сопротивление вдавливанию грунтозацепов уменьшается не только на глинистых, но и на песчаных грунтах.

Воспользовавшись полученными зависимостями и справочными данными, которые, как мы отметили, можно рассматривать в этом случае из-за ма-

лых глубин вдавливания лишь как очень приближенные и существенно завышенные, оценили ориентировочные силы сопротивления вдавливанию секций грунтозацепов. Экспериментальная проверка показала, что расчетные усилия оказались существенно больше фактических. Для получения более достоверной информации потребовалось расширенное экспериментальное исследование. Оно осуществлялось на основе изложенной здесь информации.

При приведении опоры в рабочее состояние отмечается так называемое статическое погружение секций грунтозацепов в грунт вертикальной нагрузкой, передаваемой на грунтозацепы от заполняемых емкостей, расположенных над ними. С учетом этого при выполнении опытов задавали малую скорость вдавливания грунтозацепов – 3 мм/с.

После каждого опыта, выполняемого на испытательной машине, параметры процесса вдавливания выводились на монитор в числовом и графическом виде. Пример графика приведен на рис. 4.

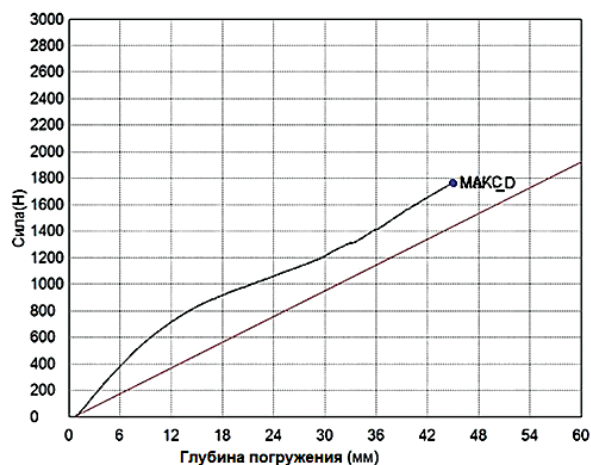


Рис. 4. Пример графика изменения усилия вдавливания от глубины погружения грунтозацепов в грунт

Fig. 4. An example of a graph showing the change in penetration force as a function of the depth that the ground lugs are pressed into soil

Фиксировали усилие, которое прилагалось к секции в момент полного вдавливания вертикальных элементов грунтозацепов в грунт, при этом контролировали вертикальное перемещение.

Для каждого образца грунта определяли с помощью пенетromетра ПСГ-МГ4 абсолютное и удельное сопротивление пенетрации, а также среднее количество ударов, необходимое для погружения наконечника динамического плотнoмера в грунт на глубину 10 см.

В данном лабораторном эксперименте и других, проводимых параллельно, были апробированы секции грунтозацепов, изготовленных из уголков 20×20×3; 32×32×3; 50×50×5; 100×100×8 мм. С этими секциями выполнены пробные серии опытов, в результате которых первые две разновидности секций грунтозацепов не были включены в перечень рекомендуемых. Одна из основных причин состояла в том, что из-за малых вертикальных размеров секций в производственных условиях сложнее будет обеспечить отсутствие контакта между дном наполняемой емкости и поверхностью грунта основания. Длину грунтозацепов секций из уголков 50×50×5; 100×100×8 мм приняли конструктивно 240 мм.

Установили, что абсолютные и удельные сопротивления пенетрации, количество ударов динамического плотномера зависят от тех же характеристик грунта, что и усилие вдавливания секции грунтозацепов в грунт. Анализ полученной при лабораторных опытах информации показал, что между указанными значениями и рассматриваемым усилием существует явно выраженная связь. При этом логично определять требуемые усилия вдавливания для конкретной секции грунтозацепов по показателям пенетromетра или количеству ударов динамического плотномера. При определении этих усилий непосредственно по характеристикам грунта их нужно будет сначала установить, как правило, инструментальными методами, что гораздо более трудоемко и не гарантирует высокой точности. В связи с этим принято решение получить по экспериментальным данным математические зависимости усилия вдавливания секций грунтозацепов от удельного сопротивления пенетрации и от количества ударов динамического плотномера.

Усилия вдавливания секций грунтозацепов в супесь оказались значительно больше, чем усилия для других видов грунтов. Это объясняется тем, что указанный образец сверху, в отличие от других, имел слой дерна. Наличие этого дерна сильно увеличивает требуемые усилия вдавливания. При вдавливании секции грунтозацепов, выполненной из уголка 100×100×8 мм, зафиксировать соответствующее усилие не удалось. Под нагрузкой, передаваемой грунтозацепами, дерн без нарушения целостности начал прогибаться, его края стали подниматься. Измеряемое при этом усилие нельзя было засчитать за достоверное. В меньшей степени это проявилось и при вдавливании через дерн секции грунтозацепов из уголка 50×50×5 мм. Исключить или нивелировать отмеченное явление можно лишь существенно увеличив размеры образцов с дерном в плане, либо путем проведения опытов в натуральных условиях.

Первый вариант проблематичен. При использовании образцов грунта с ненарушенной структурой необходимо устройство шурфов, что трудоемко, особенно при неединичных опытах. При проведении опытов в натуральных условиях потребность в шурфах отпадает. При этом решается вопрос, связанный с деформацией дерна. В связи с этим дальнейшие эксперименты проводили в натуральных условиях, опираясь на информацию, полученную в результате лабораторных работ.

По данным экспериментов получили аппроксимирующие зависимости усилия, требуемого для вдавливания секции грунтозацепов (P , Н), изготовленной из уголка 50×50×5 мм, от среднего количества ударов динамического плотномера (n) и удельного сопротивления пенетрации (p):

$$P = 1453 \ln(n) + 180; \quad (3)$$

$$P = 1446 \ln(p) + 2102, \quad (4)$$

где n – среднее количество ударов динамического плотномера; p – удельное сопротивление пенетрации, МПа.

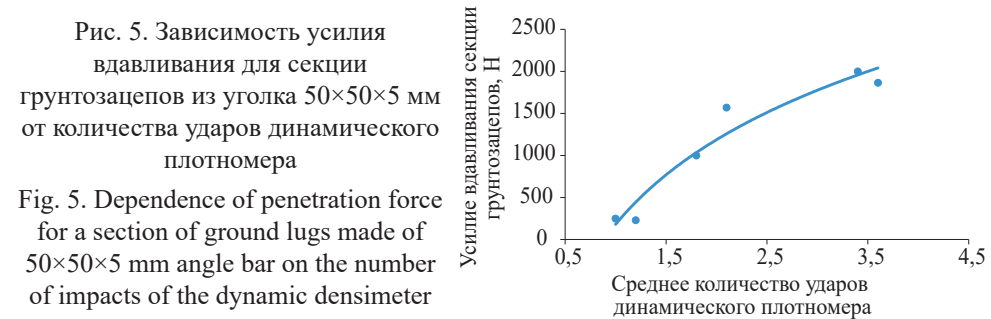
Достоверность аппроксимации для зависимости (3) – 0,941, для (4) – 0,998 [17].

Зависимости получили и для усилия вдавливания секции грунтозацепов из уголка 100×100×8 мм. Они имеют вид

$$P = 1699 \ln(n) + 646; \quad (5)$$

$$P = 2475 \ln(p) + 3948. \quad (6)$$

Достоверность аппроксимации для них – 0,859 и 0,979 соответственно.
Вид зависимости (3) наглядно демонстрирует график, приведенный на рис. 5. Характер зависимостей (4)–(6) аналогичный при количественных различиях.



Предполагаемая вертикальная нагрузка на одну секцию грунтозацепов определяется делением общей вертикальной нагрузки от наполняемой емкости опоры на количество секций. Полученную величину при практических расчетах рекомендуется сопоставить с данными таблицы, которая составлена с ориентацией на максимальные величины, зафиксированные при экспериментальных исследованиях. Если полученная в результате деления величина существенно превышает соответствующее табличное значение, то дополнительные измерения на местности и расчеты усилия вдавливания можно не выполнять. Это вероятно при установке опор на песчаных и супесчаных грунтах, не покрытых дерном. Если результат неочевиден или грунтовые условия имеют особенности, целесообразно воспользоваться пенетрометром или динамическим плотномером для измерения на конкретном месте и рассчитать по рекомендованным формулам усилие вдавливания, на основании результатов расчетов сделать соответствующий вывод. Этот вариант наиболее вероятен при установке опор на твердых глинах или на грунтах, покрытых дерном. Трудоемкость этого способа существенно ниже варианта, предполагающего пробное вдавливание секции грунтозацепов большой вертикальной нагрузкой.

Усилия, требуемые для вдавливания различных секций грунтозацепов, Н
The forces required to press the ground lug sections, N

Вид грунта	Усилия для секции, изготовленной из уголка	
	50×50×5	100×100×8
Песок	300	800
Суглинок	1250	2000
Глина твердая	1800	2300
Супесь под слоем дерна	2300	3200

Если под слоем дерна находится не супесь, а другой грунт, следует ориентироваться на величины, приведенные в нижней строке таблицы, поскольку именно дерн обуславливает наиболее существенное увеличение усилия вдавливания.

Если вертикальная нагрузка на секцию грунтозацепов недостаточна для ее вдавливания, необходимо уменьшить количество секций или использовать секции меньшего размера.

Выводы

1. Теоретическим путем получены формулы для определения усилий вдавливания секций грунтозацепов мобильных лесосплавных опор. С помощью данных формул установлены факторы, влияющие на выходные величины, характер и степень влияния этих факторов.

2. В результате экспериментальной проверки выявлено, что усилия вдавливания грунтозацепов, найденные с помощью полученных аналитических формул, существенно больше фактических, поскольку при вычислениях воспользовались расчетными сопротивлениями под основаниями строительных конструкций в грунте и на их боковых поверхностях, которые приводятся в справочной литературе для значительно больших глубин, чем рассматриваемые в данном случае. В связи с этим потребовалось проведение экспериментов, которые осуществлялись на основе информации, полученной при теоретических исследованиях.

3. Установлено, что усилие, требуемое для вдавливания секции грунтозацепов в грунт, зависит от тех же характеристик грунта, что и количество ударов динамического плотномера для погружения его наконечника на необходимую глубину и удельное сопротивление пенетрации, измеряемое пенетрометром. При лабораторных исследованиях подтверждено, что между тремя указанными величинами есть явно выраженная связь.

4. С учетом доказанной связи выполнены экспериментальные исследования в натурных условиях. Получены аппроксимирующие зависимости усилия, требуемого для вдавливания секций грунтозацепов длиной 240 мм, изготовленных из уголка 50×50×5 и 100×100×8 мм, от среднего количества ударов динамического плотномера и удельного сопротивления пенетрации.

5. Для нескольких видов грунтов приведены усилия, необходимые для вдавливания секций грунтозацепов указанных типоразмеров в грунт, с ориентацией на максимальные величины, зафиксированные при экспериментальных исследованиях.

6. Приведенные в статье данные позволяют наиболее эффективно решать вопросы, связанные с обеспечением погружения грунтозацепов в грунт, будут способствовать надежной работе мобильных наполняемых лесосплавных опор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 384 с.

Bartolomei A.A., Omel'chak I.M., Yushkov B.S. *Prediction of Settlement in Pile Foundations*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994. 384 p. (In Russ.).

2. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методом пенетрации. Часть 1 // Инженерные изыскания. 2010. № 11. С. 26–34.

Boldyrev G.G. Soil Penetration Testing. Part 1. *Engineering Survey*, 2010, no. 11, pp. 26–34. (In Russ.).

3. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методом пенетрации. Часть 2 // Инженерн. изыскания. 2010. № 12. С. 30–42.

Boldyrev G.G. Soil Penetration Testing. Part 2. *Engineering Survey*, 2010, no. 12, pp. 30–42. (In Russ.).

4. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методом динамического зондирования // Инженерн. изыскания. 2011. № 1. С. 22–30.

Boldyrev G.G. Soil Testing Using Standard Penetration Test. *Engineering Survey*, 2011, no. 1, pp. 22–30. (In Russ.).

5. Еврокуб // Завод удачных теплиц: офиц. сайт. Режим доступа: <https://tepli4ki.ru/> (дата обращения: 23.07.25).

Eurocube. *The Greenhouse Factory*: Official Website. (In Russ.).

6. Козлов К.В., Посыпанов С.В. Использование мобильных наполняемых опор для крепления наплавных объектов на лесосплаве // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 23. С. 541–545.

Kozlov K.V., Posypanov S.V. The Use of Portable Filling Supports for Fastening Floating Structures in Timber Rafting. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye*, 2020, no. 23, pp. 541–545. (In Russ.).

7. Косоруков И.И., Пешковский Л.М., Руденко-Моргун И.Я., Чичерин И.И., Дикман Л.Г., Сосков В.И. Свайные работы. М.: Высш. шк., 1974. 391 с.

Kosorukov I.I., Peshkovskiy L.M., Rudenko-Morgun I.Ya., Chicherin I.I., Dikman L.G., Soskov V.I. *Pile Works*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974. 391 p. (In Russ.).

8. Маскалева В.В. Несущая способность сваи по теоретическому методу, методу статического и динамического зондирования // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3(18). С. 104–116.

Maskaleva V.V. Bearing Capacity of Pile by the Theoretical Method, by Methods of Static and Dynamic Sounding. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, no. 3(18), pp. 104–116. (In Russ.).

9. Метелюк Н.С., Шишко Г.Ф., Соловьева А.Б., Грузинцев В.В. Сваи и свайные фундаменты. Киев: Будівельник, 1977. 256 с.

Metelyuk N.S., Shishko G.F., Solovyeva A.B., Gruzintsev V.V. *Piles and Pile Foundations*. Kyiv, Budivelnik Publ., 1977. 256 p. (In Russ.).

10. Посыпанов С.В., Козлов К.В. Теоретическое обоснование держащей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 141–151.

Posypanov S.V., Kozlov K.V. Theoretical Justification of the Holding Power of a Mobile Anchor for Holding Timber-Rafting Objects. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 141–151. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-141-151>

11. Посыпанов С.В., Козлов К.В. Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 159–174.

Posypanov S.V., Kozlov K.V. The Engineering Calculation of Flexible Shells of Timber-Rafting Anchors. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 159–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-159-174>

12. Ткани Ханхва // Торговый дом Технический текстиль: офиц. сайт. Режим доступа: https://tex.ru/catalog/tkani_hanwha_koreya/ (дата обращения: 23.07.25).

Hanwha Fabrics. *Technical Textile Trading House*: Official Website. (In Russ.).

13. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytoovich N.A. *Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

14. Alpan I. The Geotechnical Properties of Soils. *Earth-Science Reviews*, 1970, vol. 6, iss. 1, pp. 5–49. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(70\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(70)90001-2)

15. Baker W.H., Kondner R.L. Pullout Load Capacity of a Circular Earth Anchor Buried in Sand. *Highway Research Record*, 1966, no. 108, pp. 569–576.
16. Craig R.F. *Soil Mechanics*. London, E & FN Spon, 1997. 485 p.
17. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*. London, SAGE Publications Ltd, 2009. 857 p.
18. Gabrys K., Szymanski A. The Evaluation of the Initial Shear Modulus of Selected Cohesive Soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2015, vol. 37, iss. 2, pp. 3–9.
<https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0014>
19. Pongchompu P. Laboratory Study on Timber Raft & Pile Foundation on Soft Ground. *International 60th Canadian Geotechnical Conference & 8th Joint CGS/IAH-CNC Ground Water Conference. Canada*, 2007, pp. 1809–1815.
20. *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*. Ed. by K.L. Yam. John Wiley & Sons, Inc., 2009. 1376 p. <https://doi.org/10.1002/9780470541395>

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

Научная статья

УДК 620.179, 691.113, 539.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-145-156

Анизотропия и диссипативные свойства древесины

С.В. Шлычков, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [PAV-3393-2025](https://orcid.org/0009-0001-0892-0245),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0892-0245>

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия;

shlychkovsv@volgatech.net

Поступила в редакцию 22.01.26 / Одобрена после рецензирования 24.03.26 / Принята к печати 27.03.26

Аннотация. Математические модели, описывающие рассеяние энергии при колебаниях конструкций из изотропных материалов, являются приближенными и эмпирическими. В тех случаях, когда колебания совершает анизотропное тело, содержащее неоднородности, проблема корректного описания диссипации энергии колебаний встает еще более остро. Настоящая работа посвящена расчетно-экспериментальному исследованию диссипативных свойств древесины. В большинстве случаев для древесины эти свойства определяются только одним параметром – декрементом механических колебаний. Для точного моделирования динамического поведения конструкций из древесины этого недостаточно. Известно, что декремент механических колебаний не постоянен в частотном диапазоне и зависит от ориентации волокон древесины относительно направления вынуждающей силы. Эти особенности необходимо учитывать при построении адекватных математических моделей деревянных конструкций. Следовательно, разработка новых методик и выявление основных закономерностей диссипации энергии как по объему тела, так и для различных областей частотного диапазона представляются актуальными. Применен оригинальный экспериментальный метод оценки упругих и диссипативных свойств для образцов из древесины ели и березы. Для них определены модули упругости и декременты механических колебаний. Исследовано влияние анизотропии, масштабного фактора на эти параметры. Обнаружена взаимосвязь между упругими и диссипативными свойствами древесины. Установлено, что с увеличением модуля упругости в продольном направлении образца его диссипативные свойства снижаются: уменьшается логарифмический декремент колебаний. Сформулирована гипотеза о связи между упругими и диссипативными характеристиками древесины. В этом случае корректное описание характеристик рассеяния энергии для какой-либо породы древесины должно содержать не 1 константу демпфирования, а 9 – количество упругих постоянных у ортотропного тела. Адекватность полученных результатов проверена при помощи конечно-элементной модели образца из древесины. Расчетные соотношения для древесины сформулированы на основании модели ортотропного тела. Деформации сдвига учтены с помощью гипотезы С.П. Тимошенко. Результаты численных исследований подтверждаются хорошим соответствием данным натурных экспериментов.

Ключевые слова: собственная частота, модуль упругости, конечный элемент, логарифмический декремент колебаний, диссипативные свойства, свойства древесины

Для цитирования: Шлычков С.В. Анизотропия и диссипативные свойства древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 145–156.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-145-156>



Original article

Anisotropy and Dissipative Properties of Wood

Sergey V. Shlychkov, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [PAV-3393-2025](https://orcid.org/0009-0001-0892-0245),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0892-0245>

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia; shlychkovsv@volgatech.net

Received on January 22, 2026 / Approved after reviewing on March 24, 2026 / Accepted on March 27, 2026

Abstract. Mathematical models describing energy dissipation during oscillations of structures made of isotropic materials are approximate and empirical. The issue of accurately describing the energy dissipation of oscillations becomes even more acute when the oscillations occur in an anisotropic body containing inhomogeneities. This paper is devoted to a computational and experimental study of the dissipative properties of wood. In the majority of cases, these wood properties are determined by a single parameter: the decrement of mechanical oscillations. This is insufficient for accurately modeling the dynamic behavior of wood structures. It is known that the decrement of mechanical oscillations is not constant across the frequency range and depends on the orientation of the wood fibers relative to the direction of the driving force. These features have to be taken into account when developing appropriate mathematical models of wood structures. Therefore, development of new methods and determination of the energy dissipation fundamental patterns (both throughout the object volume and across various areas of the frequency range) appear to be of current relevance. This paper applies an original experimental method for assessing the elastic and dissipative properties of spruce and birch wood samples. Elastic moduli and mechanical oscillation decrements are determined for these samples. We studied the influence of anisotropy and the scale factor on these. A correlation has been found between the elastic and dissipative properties of wood. As the modulus of elasticity in the longitudinal direction of the sample increases, its dissipative properties decrease: the logarithmic decrement of the oscillations decreases. A hypothesis has been proposed concerning the relationship between the elastic and dissipative properties of wood. This means that an accurate description of the energy dissipation properties of a given type of wood should include not one damping constant, but nine (number of elastic constants for an orthotropic body). The validity of the results obtained was tested using a finite-element model of a wood sample. The computed ratios for wood are derived based on the orthotropic body model. Shear deformations are treated according to S.P. Timoshenko's hypothesis. The results of the numerical studies are confirmed by their high correspondence with the data from field experiments.

Keywords: eigenfrequency, elastic modulus, finite element, logarithmic decrement of oscillations, dissipative properties, wood properties

For citation: Shlychkov S.V. Anisotropy and Dissipative Properties of Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 145–156. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-145-156>

Введение

Механизмы рассеяния энергии механических колебаний в материалах, конструкциях из древесины и других анизотропных структур до настоящего времени остаются малоизученными. При этом данной проблеме посвящено



большое количество работ [3–5, 11, 12, 17–21]. Определение диссипативных характеристик древесины является трудной задачей, требующей использования вибрационного стенда, сложной оснастки и другой специализированной аппаратуры согласно ГОСТ 16483.31–74. Это делает реализацию данного подхода непростой и дорогой, при этом отсутствует возможность установления декремента для разных частотных диапазонов. Анализ можно проводить только на низшей собственной частоте образца, зависящей от его регламентных размеров и упругих свойств древесины. Между тем декремент не одинаков в частотном диапазоне [3, 4, 7, 8]. Эту особенность также необходимо учитывать при построении расчетных динамических моделей конструкций из древесины [5, 15]. В мировой практике для определения диссипативных свойств рекомендуется метод [17], который предполагает консольное крепление образцов и анализ затухающих колебаний. Данный метод несколько расширяет возможности исследователя, однако имеет недостатки, связанные с влиянием размеров образцов и способа крепления [4]. Попытки математического моделирования рассеяния энергии в древесине и конструкциях оказываются приближенными и эмпирическими [18–21]. Встречаются работы [7, 8, 11, 18], содержащие более подробную информацию о диссипативных свойствах древесины. В них отмечается существенная зависимость этих свойств от ориентации волокон древесины относительно направления вынуждающей силы. Таким образом, разработка новых методик [5] и выявление основных закономерностей диссипации энергии как по объему тела, так и для различных частотных областей является актуальной.

В настоящей работе решаются следующие задачи:

- экспериментальное определение декремента механических колебаний для образцов из древесины;
- установление влияния анизотропии древесины на декремент колебаний;
- выявление воздействия масштабного фактора на декремент колебаний;
- построение расчетной модели образца для оценки достоверности результатов натурных экспериментов.

Объекты и методы исследования

Экспериментальное исследование упругих и диссипативных характеристик древесины проведено на стержневых образцах 4 (рис. 1) с помощью оригинальной методики [5, 9, 15]. Данный подход предполагает исследование затухающей кривой, полученной для механической системы в виде заземленного стержня 4 с точечной массой на свободном конце 1.

Образец из древесины одним концом прикрепляется к станине прибора с помощью зажимного устройства 5. На другой конец плотно крепится металлический элемент («колпачок») массой 0,47 г. Это необходимо для осуществления связи между неметаллическим образцом и электромагнитным датчиком 3. На этот датчик с персонального компьютера (ПК) подается детерминированный электромагнитный сигнал заданной частоты. В результате возбуждаются изгибные колебания образца. Перемещениядвигающегося вместе с образцом колпачка анализируются посредством другого электромагнитного датчика 2, сигнал от которого поступает на вход звуковой платы ПК. Совпадение частоты электромагнитного сигнала с датчика 3 с собственной частотой образца приводит к возрастанию амплитуды колебаний, что отображается на мониторе ПК.

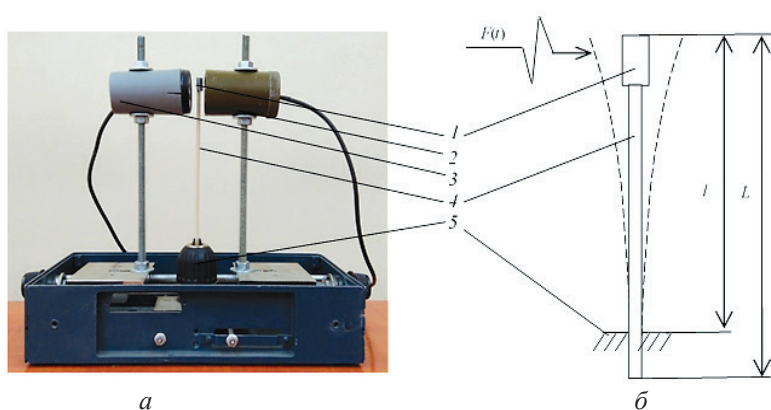


Рис. 1. Исследуемые образцы: *a* – помещенные в установку для определения упругих и диссипативных характеристик; *б* – схематичное представление образца с «колпачком», защемленным зажимным устройством

Fig. 1. Studied samples: *a* – placed in the test setup for determining elastic and dissipative properties; *б* – schematic view of a sample with a “cap” clamped by a clamping device

В случае прекращения подачи сигнала на датчик 3 образец переходит в режим затухающих колебаний (рис. 2). Анализ полученной затухающей кривой позволяет делать выводы о диссипативных свойствах образца. С помощью программы PowerGraph производится обработка полученных цифровых данных. Для оценки рассеяния энергии колебаний по частоте можно проводить спектральный анализ. Это позволяет определять спектр низших собственных частот образцов, выявлять скрытые периодичности, оценивать по высоте пиков влияние той или иной частоты на колебательный процесс.

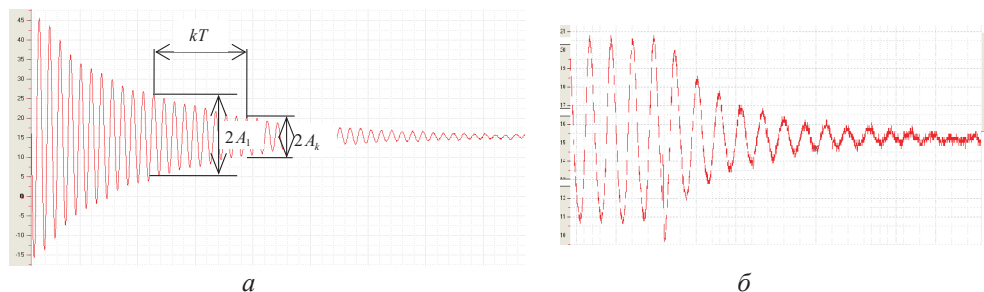


Рис. 2. График затухающих колебаний образца древесины, ориентированного: *a* – вдоль волокон; *б* – в радиальном направлении. *A* – амплитуда колебаний; *T* – условный период; *k* – количество условных периодов

Fig. 2. Graph of damped oscillations of a sample oriented: *a* – along the grain; *б* – in the radial direction. *A* – oscillation amplitude; *T* – conventional period; *k* – number of conventional periods

В результате обработки затухающих кривых устанавливался декремент Δ и логарифмический декремент колебаний δ по известным формулам [10, 22]:

$$d^{k-1} = \frac{A_k}{A_1}; \quad k = 5, 6, 7, \dots, 11; \quad \Delta = \frac{1}{d}; \quad \delta = \ln(\Delta), \quad (1)$$

где *d* – это коэффициент геометрической прогрессии, отражающий интенсивность уменьшения амплитуд затухающих колебаний; *k* – целое число условных периодов колебаний.

Величина k для уменьшения погрешности может выбираться большой. В нашем случае для образцов, затухание свободных колебаний которых имело медленный характер, $k = 11$. Образцы, ориентированные в радиальном направлении, отличались интенсивным затуханием колебаний. В этом случае принималось $k = 5$.

Расчет модуля упругости в продольном направлении образца производится на основе известного соотношения для низшей собственной частоты образца f_1 [9]. Формула (2) выводится на основании метода Рэлея для балки, жестко заделанной одним концом и имеющей точечную массу на другом конце [6, 10]:

$$f_1 = \sqrt{\frac{3EI}{ml^3 + \frac{33}{140}m_0l^4}}, \quad (2)$$

где I – геометрическая характеристика поперечного сечения образца диаметром d , $I = \frac{\pi d^4}{64}$; m – масса колпачка, г, $m = 0,47$, $m_0 = \frac{M}{L}$, M – масса образца, L – длина образца; EI – изгибная жесткость образца.

Формула (2) не учитывает влияния сдвиговых деформаций и затухания колебаний. Принятие во внимание этих параметров применительно к геометрическим размерам исследуемых образцов и полученных величин собственных частот дает погрешность не более 1 % по сравнению с точным аналитическим решением [2]. Из формулы (2) получается выражение для модуля упругости в продольном направлении образца:

$$E = \frac{f_1^2 l^3 (m + 0,24m_0 l)}{3I}. \quad (3)$$

Обладая экспериментально полученной величиной первой собственной частоты колебаний f_1 , данными о физических и геометрических параметрах образца можно оценивать модуль упругости в продольном направлении.

Образцы древесины ели получены из ствола диаметром 500 мм с помощью возрастного бурава (1–4, рис. 3). Индекс a соответствует направлению вдоль волокон древесины, r – радиальному направлению, t – окружному. Остальные образцы (5–9) извлечены из другого ствола ели. Нумерация произведена по мере возрастания угла ориентации образца от продольного направления волокон. При этом модуль упругости в продольном направлении образца должен уменьшаться [1] с возрастанием угла внедрения возрастного бурава в ствол для извлечения образца.

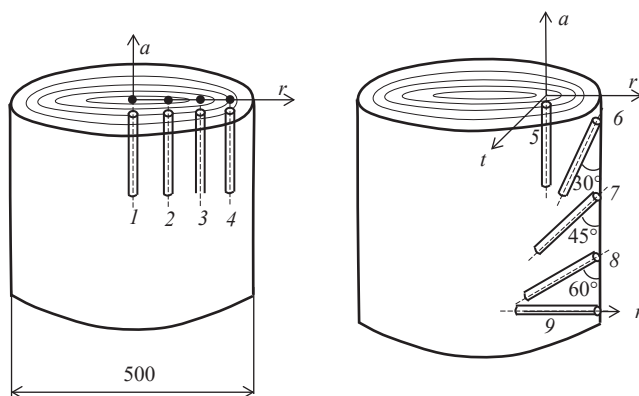


Рис. 3. Схема расположения образцов
Fig. 3. Sample layout diagram

Другая партия образцов была изготовлена из древесины березы. Порода древесины изменена с целью обобщения получаемых результатов и подтверждения достоверности используемой методики.

Под каждым порядковым номером было несколько образцов. Проведена серия экспериментов по определению упруго-диссипативных свойств этих образцов согласно описанной выше методике (табл. 1). В процессе экспериментальных исследований и обработки получаемых кривых отбирались образцы со средними упруго-диссипативными характеристиками. Эксперименты осуществлялись в помещении при температуре воздуха 20–22 °С и влажности 60 %. Влажность образцов приводилась к нормализованной согласно ГОСТ 16483.7–71 сушильно-весовым способом по отдельной партии из 30 образцов.

Таблица 1

Физические и геометрические параметры образцов
Physical and geometric parameters of the samples

Параметр	Образец								
Древесина ели									
Диаметр, мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	4,3								
Длина l , мм	100				90				
Масса M , г	1,02	1,17	1,00	1,19	0,80	0,81	0,81	0,82	0,80
Длина L , мм	113	114	113	114	101	102	101	103	100
Древесина березы									
Диаметр, мм	1			2			3	4	
	5,0	4,0	3,0	5,0	4,0	3,0	3,3	3,3	
Длина l , мм	140						170		
Масса M , г	2,30	1,68	0,93	2,77	1,85	1,03	0,80	0,93	
Длина L , мм	150						179	180	

Результаты исследования и их обсуждение

На основании экспериментальных затухающих кривых по формуле (1) определялись логарифмические декременты. По формуле (3) рассчитывались модули упругости древесины в направлении ориентации возрастного бурава, извлекающего образец. Для оценки влияния масштабного фактора у образцов 1 и 2 после первой серии экспериментов равномерным снятием материала с поверхности уменьшался диаметр до достижения 4 мм. Затем проводилась вторая серия испытаний, после которой диаметр уменьшался до 3 мм и эксперименты повторялись. Для образцов 1–4 произведена сравнительная оценка диссипативных свойств заболонной и ядровой древесины. Таким образом, было исследовано 9 образцов, для каждого из которых получено несколько затухающих кривых. Для каждого образца установлен средний декремент колебаний, среднее квадратическое отклонение *C*. Для доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ с помощью коэффициента Стьюдента t_γ определена средняя ошибка $P = 4,7\%$. Следовательно, результаты измерений можно считать надежными: истинное значение логарифмического декремента лежит в 5%-м интервале с вероятностью 0,95.

Они не позволяют сделать вывод о зависимости диссипативных свойств древесины (табл. 2) от ее принадлежности к заболонной или ядровой зонам ствола. С целью выявления влияния упругих свойств на диссипативные использованы образцы 5–9, вырезанные под разными углами в продольно-радиальной плоскости (*ar*).

Таблица 2

Упруго-диссипативные характеристики образцов из древесины ели
Elastic-dissipative properties of spruce wood samples

Параметр	Образец								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>E</i> , ГПа	10,6	18,0	10,0	14,5	10,5	2,2	0,4	0,2	0,1
δ	0,053	0,058	0,052	0,059	0,070	0,180	0,230	0,260	0,370
<i>C</i>	0,355·10 ⁻²				–	–	–	–	–
<i>t_γ</i>	2,132				–	–	–	–	–
<i>P</i> , %	6,9				–	–	–	–	–
<i>v</i> экспериментальная	140	219	137	160	160	74	31	25	15
<i>v</i> расчетная (МКЭ)	143	205	139	164	163	76	31	26	15

Примечание: *v* – низшая собственная частота колебаний; МКЭ – метод конечных элементов.

По данным таблицы, истинное значение логарифмического декремент-а для образцов 1–4 с вероятностью 0,9 лежит в интервале (0,055±0,0037). Экспериментально определенный модуль упругости по низшей частоте колебаний образца получается точным, поскольку данная величина, использованная при расчете МКЭ, дает практически такую же частоту. В худшем случае ошибка лежит в пределах 6 %. В то же время модуль упругости древесного материала у образцов 1–4 существенно различается. Видимо, это связано с заметной разницей плотности древесного материала, из которого были вырезаны эти образцы: один состоял преимущественно из более ранней древесины, а другой – из более поздней.

Зависимость между упругими и диссипативными свойствами прослеживается четко. С уменьшением модуля упругости в продольном направлении образца (от 18 ГПа до 100 МПа) его диссипативные свойства, определяемые логарифмическим декрементом, возрастают (от 0,05 до 0,37). Зависимости логарифмического декремента колебаний и модуля упругости образца в продольном направлении от угла *α* (угол между продольной осью образца и направлением волокон древесины в образце) представлены на рис. 4.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает нелинейную обратно пропорциональную зависимость между упругими и диссипативными свойствами. Образцы с высоким модулем упругости, вырезанные в продольном направлении, обладают наиболее низким логарифмическим декрементом. И наоборот, образцы, вырезанные в радиальном направлении и имеющие в 20–30 раз меньший модуль упругости, обладают в 7 раз большим логарифмическим декрементом. Известные справочные данные [1] хорошо согласуются с результатами поставленных экспериментов. Расхождения между ними объясняются тем, что использованная формула (3) получена для изотропной структуры и не учитывает влияние сдвиговых деформаций [22].

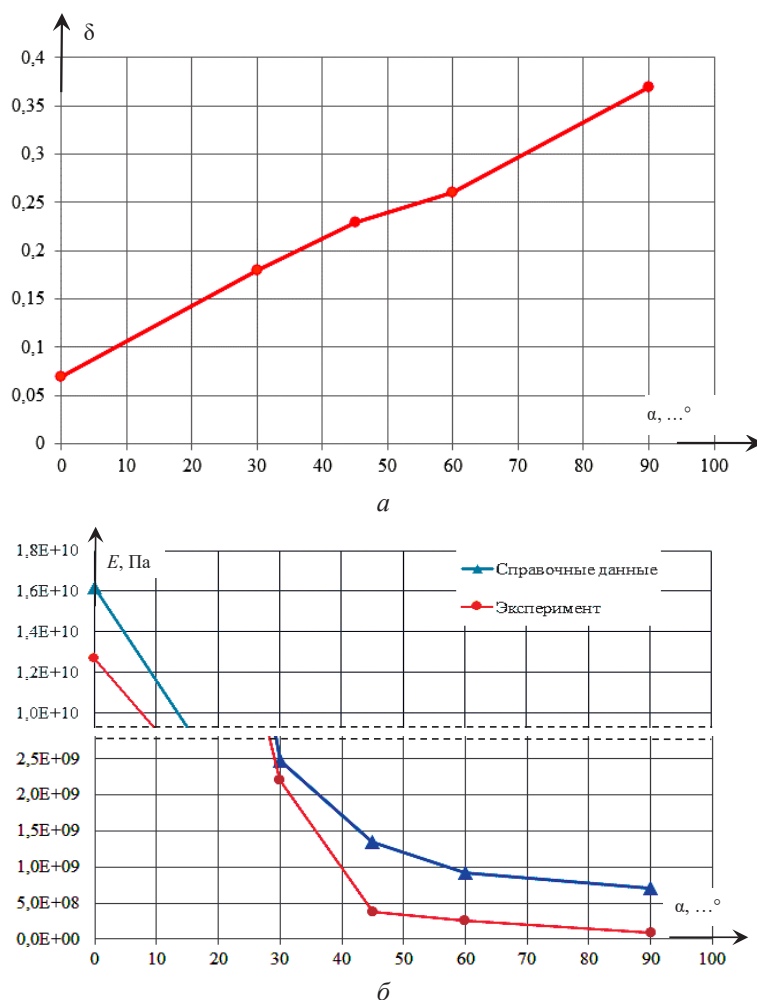


Рис. 4. Анизотропия логарифмического декремента колебаний древесины:
 a – ели; b – сосны

Fig. 4. Anisotropy of logarithmic decrement of wood vibrations: a – spruce; b – pine

Для оценки влияния масштабного фактора использованы 4 образца, вырезанные вдоль волокон древесины березы (см. табл. 1). У образцов 1 и 2 после каждой серии экспериментов менялся размер поперечного сечения. При этом установившиеся колебания образцов последовательно возбуждались гармонической силой с разной амплитудой. Сначала возбуждались колебания образца диаметром 5 мм посредством гармонической силы $F(t) = 0,2F\sin(pt)$. После перехода образца в режим установившихся колебаний источник вибраций выключался, образец переходил в режим затухающих колебаний, и производилось измерение декремента. Затем возбуждались колебания образца диаметром 4 мм посредством гармонической силы $F(t) = 0,6F\sin(pt)$ – измерялся декремент. В третий раз с тем же образцом диаметром 3 мм использовалась максимальная вынуждающая сила $F(t) = F\sin(pt)$ – измерялся декремент. Таким образом, было исследовано 8 образцов, для каждого из которых получено 3 затухающих кривых с различным уровнем начальной амплитуды. Для каждого образца установлен средний декремент колебаний, среднее квадратическое отклонение, определена точность опыта (табл. 3).

Таблица 3

Упругие и диссипативные характеристики образцов из древесины березы
Elastic and dissipative properties of birch wood samples

Показатель	Образец							
	1			2			3	4
F_0 , 20 %*	1,14	1,17	1,07	1,19	1,17	1,03	1,07	1,10
F_0 , 60 %	1,29	1,16	1,06	1,26	1,11	1,03	1,06	1,07
F_0 , 100 %	1,31	1,18	1,04	1,22	1,14	1,03	1,05	1,08
$\Delta_{ср}$	1,25	1,17	1,06	1,22	1,14	1,03	1,06	1,08
C	0,09	0,01	0,03	0,04	0,03	0	0,01	0,02
t_γ	2,353	3,182	3,182	2,353	3,182	5,841	3,182	3,182
γ	0,90	0,95	0,95	0,90	0,95	0,99	0,95	0,95
P , %	9,6	1,6	2,6	4,6	4,8	0	1,7	2,5
δ	0,22	0,17	0,06	0,20	0,13	0,03	0,06	0,08
E_a , ГПа	16	20	18	12	14	13	16	18
ν экспериментальная, Гц	88	69	40	72	55	43	63	64
ν расчетная МКЭ, Гц	89	70	41	75	54	44	64	66

*20, 60, 100 % – интенсивность силового воздействия на образец.

На основе статистической обработки экспериментальных данных получается, что истинный декремент колебаний, рассчитанный для образца 1 диаметром 5 мм лежит в пределах $1,13 \leq 1,25 \leq 1,37$ с вероятностью 90 %. Это наименее удачный результат из полученных. Для образца 2 диаметром 3 мм истинный декремент равен 1,03 с вероятностью 99 %. Это наиболее удачный вариант. В целом результаты измерений получились надежными. Анализ представленных в таблице данных показывает отсутствие влияния амплитуды колебаний на декремент колебаний. У образца 1 декремент возрастает на 15 %, у образца 3 – уменьшается на 2 %. В случае образца 2 изменения отсутствуют. При этом влияние размеров образца на его диссипативные свойства очевидно. С уменьшением их размеров (объем образцов снизился более чем в 2 раза) логарифмический декремент колебаний получается в 4–6 раз меньше. Этот эффект не следует связывать исключительно с размерами колеблющегося тела. Уменьшение размеров образца приводит к падению его инерционных и жесткостных свойств. При этом точечная масса (металлический колпачок) была неизменной. Уменьшенный объем материала древесины был не в состоянии обеспечить такой же уровень рассеивания энергии механических колебаний, как более массивный образец. Следовательно, этот эффект может быть связан с изменением соотношения между упругими и инерционными свойствами механической системы (образец с колпачком) в пользу последних – происходит изменение динамических свойств образца. В связи с этим для затухания колебаний тонких образцов требуется более длительный период времени, чем для затухания колебаний более массивных образцов. Следует также отметить, что образцы из древесины березы имеют несколько больший модуль упругости, чем образцы из древесины ели, и несколько меньший декремент колебаний. Это согласуется с данными [1, 13].

Экспериментально определенный модуль упругости по низшей частоте колебаний образца получается точным, поскольку данная величина, использованная при расчете МКЭ, дает практически такую же частоту. В худшем случае ошибка получается в пределах 3 %. Нестабильность модуля упругости для одного и того же материала у образцов 1 и 2 объясняется неравномерным снятием материала с поверхности образца при изменении его диаметра (отклонение от цилиндрической формы).

Конечно-элементная модель [9, 14, 15] на основе полученных данных построена с помощью программного комплекса Ansys [16]. Для дискретизации образцов использованы 3-узловые балочные конечные элементы с 6 степенями свободы в узле. Данный конечный элемент построен на основе теории С.П. Тимошенко, учитывающей деформации сдвига [22]. Задача динамики описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[M] \{\ddot{q}\} + [B] \{\dot{q}\} + [K] \{q\} = \{F(t)\}, \quad (4)$$

где $[M]$, $[B]$, $[K]$ – матрицы масс, демпфирования, жесткости конструкции соответственно; $\{\ddot{q}\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{q\}$ – векторы обобщенных ускорений, скоростей и перемещений соответственно. Вектор нагрузки имеет вид $\{F(t)\} = F_0 \sin(pt)$, где p – круговая частота возбуждения; t – время. Дифференциальные уравнения (4) моделируют вынужденные моногармонические колебания механической системы с вязким трением. Коэффициенты матрицы демпфирования подбираются эмпирически. Порядок матриц равняется числу степеней свободы. Для задания упругих свойств древесины использованы данные [1] и результаты проведенных экспериментов в части модуля упругости в продольном направлении образца. Сопоставление частот (f_1), определенных с помощью разработанной экспериментальной методики [5], с частотами, рассчитанными МКЭ, показывает их соответствие.

Заключение

Разработана методика экспериментальной оценки упругих и диссипативных характеристик древесины. Для образцов из древесины ели и березы определены модули упругости и декременты колебаний. Полученные результаты сопоставлены с известными данными. Установлено удовлетворительное соответствие. С целью проверки адекватности результатов на базе метода конечных элементов построена расчетная динамическая модель консольной балки из древесины – образца. Исследован спектр колебаний образца в зависимости от его физико-механических свойств. Установлено хорошее соответствие результатам натурных экспериментов. На примере образцов из древесины ели установлена нелинейная обратно пропорциональная взаимосвязь логарифмического декремента колебаний образца от модуля упругости в продольном направлении.

Таким образом, для древесины декремент зависит от направления действия напряжений, возникающих в материале колеблющегося тела. Поскольку физико-механические свойства древесины (ортотропного тела) определяются 9 упругими постоянными, то, соответственно, и характеристики, описывающие рассеяние энергии колебаний в древесине, должны содержать 9 констант. Однако проведение экспериментов для их корректного определения представляется достаточно сложным. В связи с этим в первом

приближении для определения характеристик рассеяния можно использовать известные диаграммы анизотропии модулей упругости, опираясь на которые, с учетом полученной обратно пропорциональной зависимости между модулем упругости образца и его декрементом, можно приближенно оценивать декременты колебаний в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях. При этом корректное установление рассеяния энергии в древесине должно проводиться тензором диссипативных характеристик аналогично тензору упругих постоянных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anisotropy of Structural Materials*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 247 p. (In Russ.).
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. шк., 1980. 408 с.
Biderman V.L. *Theory of Mechanical Oscillations*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).
3. Макарьева Т.А. Исследование акустических характеристик древесины, используемой для дек музыкальных инструментов, и разработка методов их контроля в условиях производства: дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 200 с.
Makar'yeva T.A. *A Study of the Acoustic Properties of Wood Employed for Musical Instrument Tops and the Development of Methods for Their Control in Production Conditions*: Cand. Engin. Sci. Diss. Moscow, 1975. 200 p. (In Russ.).
4. Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Гюнал И., Шишкин В.М. Теоретико-экспериментальный метод определения аэродинамической составляющей демпфирования тест-образца ромбовидного поперечного сечения // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2016. № 4. С. 200–219.
Paimushin V.N., Firsov V.A., Gyunal I., Shishkin V.M. Theoretical-Experimental Method for Determination of Aerodynamic Damping Component of Test Samples with Diamond-Shaped Cross-Section. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 200–219. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.4.12>
5. Патент 2715222 С1 РФ, МПК G01N. Способ определения упруго-диссипативных характеристик древесины: № 2019103387: заявл. 07.03.2019; опубл. 26.02.2020 / С.В. Шлычков.
Shlychikov S.V. *Method of Determining Elastic-Dissipative Characteristics of Wood*. Patent RF, no. RU 2715222 C1, 2020. 8 p. (In Russ.).
6. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Handbook of Materials Strength*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1988. 736 p. (In Russ.).
7. Пищик И.И. Датирование древесины длительной выдержки неразрушающими методами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 31 с.
Pishchik I.I. *Non-Destructive Dating of Long-Aged Wood*: Dr. Engin. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2005. 31 p. (In Russ.).
8. Пищик И.И. К вопросу использования длительно выдержанной древесины в музыкальных инструментах // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2012. № 3. С. 115–119.
Pishchik I.I. On the Issue of Using Long-Seasoned Wood in Musical Instruments. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 3, pp. 115–119. (In Russ.).
9. Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М., Шлычков С.В. Идентификация упругих свойств древесины // Фундамент. исследования. 2013. № 10, ч. 12. С. 2625–2629.

Saldaeva E.Y., Tsvetkova E.M., Shlychkov S.V. Identification of the Elastic Properties of Wood. *Fundamental research*, 2013, no. 10, part 12, pp. 2625–2629. (In Russ.).

10. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. М.: Высш. шк., 1973. 456 с.

Svetlitskiy V.A., Stasenko I.V. *Collection of Tasks in the Theory of Oscillations*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 456 p. (In Russ.).

11. Тулузаков В.В. О логарифмическом декременте затухания резонансной древесины // Науч. тр. МЛТИ. 1981. Вып. 131. С. 11–14.

Tuluzakov V.V. On the Logarithmic Decrement of Attenuation of Resonant Wood. *Nauchnyye trudy MLTI*, 1981, iss. 131, pp. 11–14. (In Russ.).

12. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Wood Science and Forest Commodity Science*. Moscow, MGUL Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

13. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский, М.Е. Бродов, М.В. Быстрое и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.

Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M., Brodov M.E., Bystroye M.V., et al. *Physical Quantities: Handbook*. Ed. by I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhova. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991. 1231 p. (In Russ.).

14. Шлычков С.В. Влияние породы древесины на качество акустических панелей // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2016. Т. 20, № 4. С. 60–63.

Shlychkov S.V. Influence of Wood Species on the Quality of Acoustic Panels. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 60–63. (In Russ.).

15. Шлычков С.В., Тарасова О.Г. Идентификация упруго-диссипативных свойств древесины // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы, конструкции, технологии. 2022. № 3. С. 34–42.

Shlychkov S.V., Tarasova O.G. Identification of Elastic-Dissipative Properties of Wood. *Bulletin of Volga State University of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies"*, 2022, no. 3, pp. 34–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2022.3.34>

16. *ANSYS Mechanical APDL Verification Manual*. ANSYS, Inc. Release 15.0 Southpointe, November 2013, 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317. ANSYS Inc., 2013. Available at: <http://www.ansys.com> (accessed 21.06.26).

17. *ASTM E-756. Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials*. S. 1. ASTM Intern., 2004.

18. Bremaud I., Gril J., Thibaut B. Anisotropy of Wood Vibrational Properties: Dependence on Grain Angle and Review of Literature Data. *Wood Science and Technology*, 2011, vol. 45, pp. 735–754. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0393-8>

19. Bremaud I., Gril J. Moisture Content Dependence of Anisotropic Vibrational Properties of Wood at Quasi Equilibrium: Analytical Review and Multi-Trajectories Experiments. *Holzforschung*, 2021, vol. 45, no. 4, pp. 313–327. <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0028>

20. Bucur V. *Acoustics of Wood*. Berlin, Springer, 2006. 394 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7>

21. Guiman M.V., Stanciu M.D., Roșca I.C., Georgescu S.V., Năstac S.M., Câmpean M. Influence of the Grain Orientation of Wood upon Its Sound Absorption Properties. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 17, art. 5998. <https://doi.org/10.3390/ma16175998>

22. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Mechanics of Materials*. New York, Van Nostrand Company, 1972. 575 p.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest

Научная статья

УДК 674.419.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-157-170

Структура и прочностные характеристики фанеры на модифицированном связующем

А.А. Федотов[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Т.Н. Вахнина, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

И.В. Сусоева, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

А.А. Титунин, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

Костромской государственный университет, г. Кострома, Россия; aafedotoff@yandex.ru[✉],
t_vachnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru, a_titunin@kosgos.ru

Поступила в редакцию 24.11.25 / Одобрена после рецензирования 18.02.26 / Принята к печати 20.02.26

Аннотация. Целью исследования является повышение механических показателей фанеры, изготавливаемой при температуре прессования 105 °С на фенолоформальдегидной смоле, модифицированной медьсодержащими добавками или резорцином. Изготовлена 5-слойная фанера ФСФ из березового шпона толщиной 1,5 мм и связующего на основе фенолоформальдегидной смолы. В качестве модификаторов использовались ацетат меди, резорцин, резорцинат меди в виде водных растворов 10%-й концентрации. Оценивались прочность фанеры при статическом изгибе и прочность при скалывании по клеевому слою после кипячения. Получены ИК-спектры связующего и фанеры. Выявлено, что при модификации смолы ацетатом и резорцинатом меди уменьшается количество гидроксильных и гидроксиметильных групп, повышается гидролитическая устойчивость связующего вследствие образования координационных связей между ионом меди и гидроксильными группами связующего, при модификации смолы резорцином количество гидроксильных групп почти не меняется, но увеличивается число групп $-CH_2$. Установлено, что при низкотемпературном прессовании модификация смолы резорцинатом меди привела к увеличению прочности при скалывании по клеевому слою на 52,2 %, резорцином – на 70,0 %, ацетатом меди – на 78,8 % в сравнении с показателем образцов на фенолоформальдегидной смоле. Прочность фанеры при статическом изгибе максимальна для образцов с ацетатом меди и резорцином, она выше, чем у образцов, изготовленных при температуре 120 °С. Использование для модификации при 105 °С ацетата меди и резорцина обеспечивает сопоставимые механические показатели фанеры. Ввиду того, что стоимость ацетата меди ниже, чем резорцина, для промышленности при низкотемпературном прессовании рекомендуется модификация фенолоформальдегидной смолы ацетатом меди. Снижение температуры прессования позволит уменьшить затраты предприятий на производство водостойкой фанеры.

Ключевые слова: фанера ФСФ, фенолоформальдегидное связующее, модификаторы, горячее прессование, механические показатели, ИК-спектры

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 24-29-20157.

Благодарности: Использовано оборудование испытательной лаборатории ФГУП «Центрального научно-исследовательского института химии и механики» (г. Москва). Контроль результатов осуществлен в испытательной лаборатории древесных плит и фанеры ООО «Лессертика», г. Балабаново.

Для цитирования: Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., Титунин А.А. Структура и прочностные характеристики фанеры на модифицированном связующем // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 157–170. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-157-170>

Original article

Structure and Strength Properties of Plywood with Modified Binder

Aleksandr A. Fedotov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1155-2018](https://orcid.org/0000-0002-3668-899X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Tatiana N. Vakhnina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1116-2018](https://orcid.org/0000-0002-7201-5979), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Irina V. Susoeva, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [R-1053-2018](https://orcid.org/0000-0002-7295-8934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Andrey A. Titunin, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [W-5121-2017](https://orcid.org/0000-0002-0953-0898), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0953-0898>

Kostroma State University, Kostroma, Russia; aafedotoff@yandex.ru[✉], t_vakhnina@mail.ru, i.susoeva@yandex.ru, a_titunin@kosgos.ru

Received on November 24, 2025 / Approved after reviewing on February 18, 2026 / Accepted on February 20, 2026

Abstract. The research is aimed at improving the mechanical properties of plywood produced at a pressing temperature of 105 °C using phenol-formaldehyde resin modified with copper-containing additives or resorcin. The 5-layer waterproof plywood is made of 1.5 mm thick birch veneer and a phenol-formaldehyde resin binder. Copper acetate, resorcin, and copper resorcinate were used as modifiers (10 % aqueous solutions). We evaluated the strength of plywood under static bending and its strength when shearing along the adhesive layer after boiling. IR spectra of the binder and the plywood were obtained. The number of hydroxyl and hydroxymethyl groups decreases, and the hydrolytic stability of the binder increases due to the formation of coordinate bonds between the copper ion and the hydroxyl groups of the binder when the resin is modified with copper acetate and copper resorcinate. The number of hydroxyl groups remains virtually unchanged, but the number of –CH₂ groups increases when the resin is modified with resorcin. Modification of the resin with copper resorcinate during low-temperature pressing resulted in a 52.2 % increase in shearing strength along the adhesive layer, with resorcin – a 70.0 % increase, and with copper acetate – a 78.8 % increase, compared to the values for samples made with phenol-formaldehyde resin. The static bending strength of plywood is the highest for the samples containing copper acetate and resorcin; it is higher than that of the samples produced at 120 °C. The use of copper acetate and resorcin for modification at 105 °C provides comparable mechanical properties of plywood. Since copper acetate is less expensive than resorcin, the use of a copper acetate-modified phenol-formaldehyde resin is recommended for industrial applications requiring low-temperature pressing. Lowering the pressing temperature will reduce the costs associated with the production of water-resistant plywood.

Keywords: waterproof plywood, phenol-formaldehyde binder, modifiers, hot pressing, mechanical properties, IR spectra

Funding: The research was carried out as part of research project No. 24-29-20157 with financial support from the Russian Science Foundation and the Administration of the Kostroma Region.

Acknowledgments: We used the equipment of the Testing Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “Central Research Institute of Chemistry and Mechanics” (Moscow). The results were verified at the Wood-Based Panels and Plywood Testing Laboratory of the OOO Lessertika in the city of Balabanovo.

For citation: Fedotov A.A., Vakhnina T.N., Susoeva I.V., Titunin A.A. Structure and Strength Properties of Plywood with Modified Binder. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 157–170. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-157-170>

Введение

Фенолоформальдегидное связующее традиционно используется для производства фанеры ФСФ благодаря возможности обеспечения физико-механических показателей, необходимых для применения материала в строительстве. Баланс высокой прочности при статическом изгибе и низкого разбухания по толщине после пребывания в воде позволяет использовать материал в качестве многооборотной опалубки. Характеристикой водостойкости и качества склеивания шпона в композит является прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения.

В мировом производстве материалов на синтетических связующих самыми крупнотоннажными (в порядке объемов использования) являются карбаминоформальдегидные (КФС), меламинокарбаминоформальдегидные (МКФС), фенолоформальдегидные (ФФС) смолы и полиизоцианаты (ПМДИ) [27, 28]. При высоких физико-механических показателях фанеры на формальдегидных связующих их основным недостатком является токсичность исходных компонентов, используемых при синтезе. Поэтому в России и за рубежом ведутся работы в направлении применения бесформальдегидных связующих для производства фанеры строительного назначения. На связующем из измельченной пальмоядровой скорлупы, глицерина и лимонной кислоты группой исследователей получена фанера прочностью при скалывании по клеевому слою более 1 МПа. При этом температура прессования составляла 200 °С, что значительно увеличивает энергоемкость производства [10]. Чаще всего подобные технологии или не обеспечивают соответствия показателей материала нормативным требованиям ГОСТ 3916.1–2018, или связаны со значительным увеличением затрат на производство фанеры [4, 7, 9, 11].

Используются также способы модификации ФФС для изготовления фанеры продуктами гидролизного расщепления сульфатного лигнина хвойных пород [16], пиролизной жидкостью [22], нанолигнином с эвтектическим растворителем [30]. Близко по свойствам к фенолоформальдегидному связующему на основе лигнина из рисовой соломы [12] и связующее из лигнина листьев финиковой пальмы [13]. Однако для большинства видов клеев водостойкость на альтернативных видах связующего сохраняется только при воздействии холодной воды [8, 14, 31]; низкая гидролитическая устойчивость альтернативных связующих приводит к снижению прочности фанеры после кипячения.

В исследовании Г.А. Камке сравнивалась водостойкость фанеры, полученной прессованием на ФФС и на 1,3-диметил-4,5-дигидроксиэтиленмочевине (DMDHEU) [15]. Оценивалось разбухание фанеры по толщине после нанесения воды путем разбрызгивания, пребывания в воде и воздействия высокой влажности через 192 ч. Исследователи получили данные, что первоначально разбухание было меньше у фанеры на ФФС, но через 24 ч вымачивания в воде разбухание по толщине в образцах по двум рассмотренным в работе вариантам выравнилось. Фанера имеет чрезвычайно высокий показатель (более 60 %), в разы превышающий значение для фанеры, изготавливаемой в производственных условиях.

Такие связующие, как фурановая смола, позволяют производить фанеру с большими водостойкостью и механическими показателями [26], но стоимость фурановой смолы превышает стоимость ФФС, и она не производится в таких объемах, как ФФС.

Большое количество работ российских и зарубежных исследователей направлено на модификацию ФФС с целью улучшения физико-механических свойств и/или снижения стоимости связующего и фанеры на его основе.

Y. Zhang с коллегами модифицировали ФФС добавкой силикозоля, что улучшило нанесение на шпон и проникновение связующего в древесину, а также повысило термостойкость полученного композита [32].

J. Kawalerczyk с коллегами использовали армирование ФФС наноцеллюлозой, что позволило повысить реологические свойства связующего и водостойкость фанеры [17]. Из отечественных ученых модификацию ФФС для производства водостойкой фанеры нанокристаллической целлюлозой использовала Е.В. Ющенко [6].

В работе Е.Г. Соколовой и группы исследователей оценено влияние модифицирующей добавки технического аэросила на свойства клеевых композиций [3]. Следует отметить, что кислоты, входящие в состав аэросила, снижают pH связующего до 2,0...3,5, что в технологическом плане требует исключения операции холодной подпрессовки и обеспечения быстрой загрузки в горячий пресс пакета шпона после нанесения связующего. Также данная группа исследователей совместно с С.А. Угрюмовым использовали для модификации ФФС и меламинакарбаминоформальдегидной смолы добавки таких модификаторов, как пектол, технические лигносульфонаты и доломитовая мука. Добавление модификаторов позволило улучшить физико-химические характеристики клеев и повысить прочностные свойства фанеры [25].

Возможна и модификация фенолоформальдегидной смолы растворами хлорида алюминия и хлорида магния при низкотемпературном режиме прессования и пониженном расходе связующего, что дает снижение себестоимости материалов на фоне высоких механических характеристик [5].

Представляют интерес работы по модификации ФФС соединениями меди. Модифицирование ФФС медьсодержащими солями по-разному сказывается на показателях фенолоформальдегидного связующего и композитов на его основе. Так, в работе В.Д. Ерошенко с соавторами [2] отмечена способность резорцината меди стабилизировать гидроксильные группы ФФС путем образования химических и координационных связей. В исследовании Tengfei Yi с коллегами сделан вывод о снижении физико-механических показателей плит OSB (плит древесных с ориентированной стружкой) на связую-

щем, модифицированном наночастицами оксида меди, причем пик термического разложения модифицированной ФФС сдвинут в сторону более низких температур [29].

Однако в работе Li F. с группой исследователей при использовании ИК-спектроскопии доказано, что модифицированное наномедью фенолоформальдегидное связующее проникает в клеточные стенки древесины и взаимодействует с ацетильными группами гемицеллюлозы, образуя сшитую структуру. По данным авторов, механические свойства клеточных стенок древесины были улучшены после обработки ФФС модифицированной наномедью. Авторы отмечают, что наночастицы оксидов алюминия и меди широко используются для повышения физических и механических свойств ФФС [18].

Таким образом, для оценки влияния медьсодержащих модификаторов на показатели ФФС и фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего необходима более глубокая экспериментальная проработка вопроса.

Целью данного исследования является оценка влияния медьсодержащих модификаторов (в сравнении с резорцином) на показатели фенолоформальдегидного связующего и фанеры на его основе, а также повышение механических показателей фанеры ФФС, изготавливаемой при сниженной температуре прессования, путем модификации фенолоформальдегидного связующего.

Объекты и методы исследования

На первом этапе в лабораторных условиях подготавливались образцы жидкой фенолоформальдегидной смолы без добавки модификатора и с добавкой 1 % модификатора от массы жидкой смолы. Полученные образцы помещались в сушильный шкаф ШСУ и высушивались при температуре 105 °С до постоянной массы. Далее полученные образцы измельчались в лабораторной мельнице ЛМ 201.

На втором этапе в лабораторных условиях изготавливались образцы 5-слойной фанеры ФФС в прессе П100-400 2Э из березового лущеного шпона номинальной толщиной 1,5 мм (ГОСТ 99–2016) и ФФС СФЖ-3014 (ГОСТ 20907–2016) с добавкой 1 % модификатора от массы смолы. Использовались добавки к смоле, вводимые в виде водных растворов 10%-й концентрации: ацетат меди $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ по ГОСТ 5852–79, резорцин $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2$ по ГОСТ 9970–74, резорцинат меди $\text{Cu}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2)_2$. Резорцинат меди получали путем перемешивания эквимольной смеси растворов резорцина и ацетата меди.

Фанера производилась при следующих постоянных факторах: температура прессования – 105 °С; продолжительность прессования – 10 мин; расход смолы – 93 г/м² поверхности осмоления; удельное давление прессования – 1,6 МПа.

Контрольные образцы на ФФС без модификаторов прессовались при температуре 105 и 120 °С.

ИК-спектры связующего и фанеры снимали на спектральном комплексе на базе ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10. Спектры промаркированы спектрометром аббевитурой КГУ с номером спектра. Образцы были исследованы методом ИК-спектроскопии в режиме НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения, кристалл – германий, спектральный диапазон – 4000–600 см^{–1}).

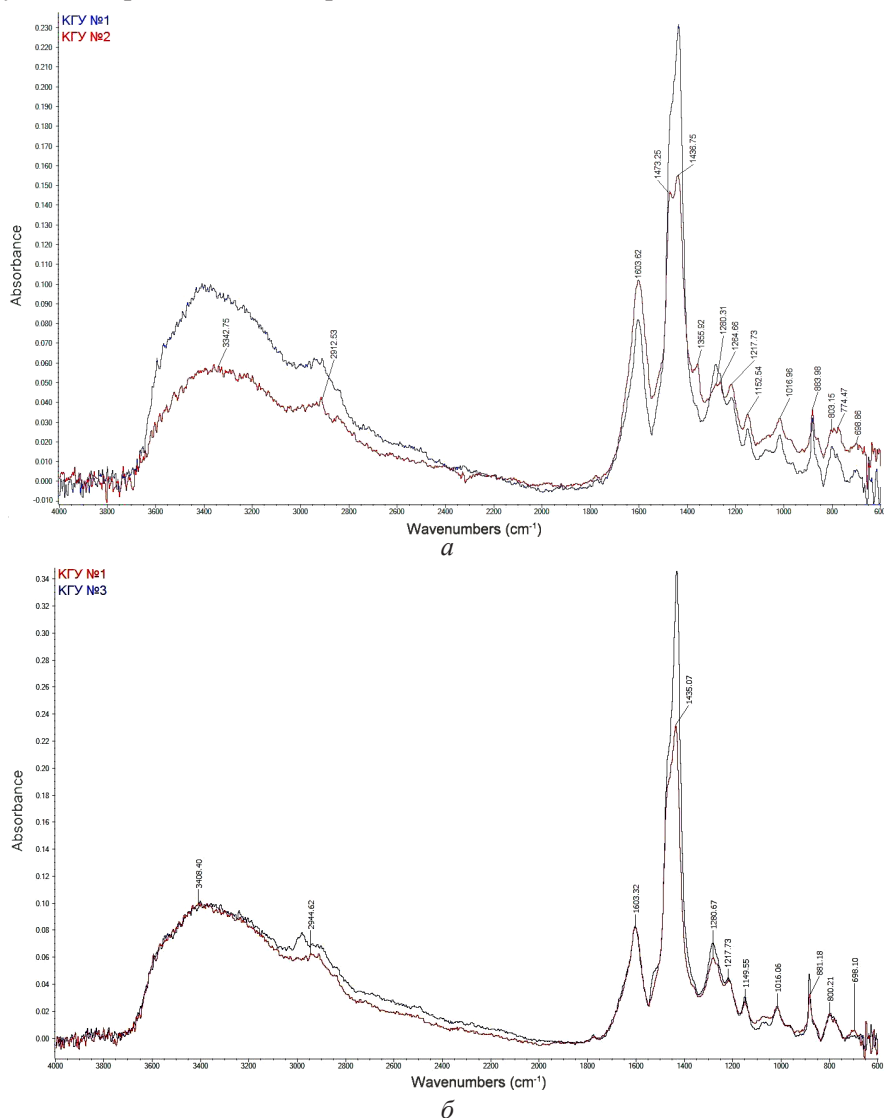
Согласно требованиям ГОСТ 3916.1–2018 оценивались предел прочности фанеры при статическом изгибе (по ГОСТ 9625–2013) и предел прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч (по ГОСТ 9624–2009).

Количество испытанных образцов (число дублированных опытов) – 12. Для определения прочности образцов при статическом изгибе, при скалывании по клеевому слою использовалась испытательная машина 2166 Р-5 (цена деления – 0,1 Н).

Контроль результатов определения прочности фанеры при скалывании по клеевому слою выполнен в испытательной лаборатории древесных плит и фанеры.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные ИК-спектры твердых образцов фенолоформальдегидного связующего представлены на рис. 1.



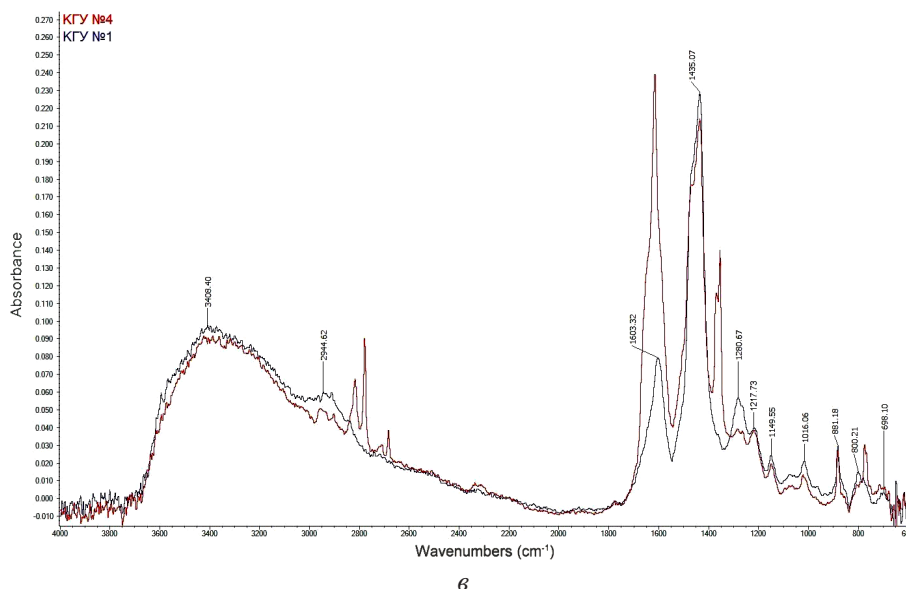


Рис. 1. ИК-спектры твердых образцов фенолоформальдегидного связующего: *а* – образцов № 1 (контрольный образец) и 2 (образец с добавкой ацетата меди); *б* – образцов № 1 и 3 (образец с добавкой резорцина); *в* – образцов № 1 и 4 (образец с добавкой резорцината меди) Здесь и на рис. 2: Absorbance – оптическая плотность; Wavenumbers – волновое число

Fig. 1. IR spectra of solid samples of a phenol-formaldehyde binder: *a* – samples no. 1 (reference sample) and 2 (sample with copper acetate added); *б* – samples no. 1 and 3 (sample with resorcin added); *в* – samples no. 1 and 4 (sample with copper resorcinate added)

При модификации ФФС ацетатом меди уменьшается количество групп –ОН, участвующих в межмолекулярных водородных связях, об этом говорит снижение интенсивности поглощения в области полосы 3400–3500 см^{-1} с 0,1 до 0,06 (рис. 1, *а*). При модификации смолы резорцином и резорцинатом меди количество групп –ОН практически не меняется (рис. 1, *б*, *в*). Пики в области полосы поглощения 1435 см^{-1} для ФФС характеризуют деформационные колебания связей в группах $-\text{CH}_2$.

Пики в области полосы поглощения 1603 см^{-1} для трех разных модификаторов имеют значительные отличия в интенсивности поглощения. Область спектра 2000–1500 см^{-1} относится к деформационным колебаниям Н–О–Н, характерным для присутствия прочно связанной воды [1]. Смола, модифицированная солями меди, и отвержденная при температуре 105 °С, содержит прочно связанную воду. В спектре контрольного образца интенсивность поглощения составляет 0,08; в спектре образца с добавкой ацетата меди – 0,1; образца с добавкой резорцина – почти не отличается от интенсивности контрольного образца. Значительное увеличение количества деформационных колебаний связей Н–О–Н (полоса 1603 см^{-1}) в спектре смолы с добавкой резорцината меди обусловлено наличием прочно связанной воды, интенсивность поглощения возрастает от 0,08 до 0,24 в сравнении с контрольным образцом без модификатора. Это объясняется тем, что резорцинат меди, как и другие соли меди [24], содержится в связующем на стадии приготовления раствора в виде кристаллогидрата. При модификации ФФС резорцином количество химически связанной воды в отвержденном связующем не изменяется. Химически связанная вода

отщепляется из кристаллогидратов, включая соли меди, при разных температурах. Из твердого вещества связанная вода выделяется при прокаливании с температуры 200...250 °С [23], а в композициях с водой она начинает выделяться при температуре около 60 °С и полностью удаляется при температуре от 90 до 108 °С [19]. В ходе исследования прессование фанеры выполнено при температуре 105 °С. Увеличение количества связанной воды требует большего времени прессования, чтобы не снизить гидролитическую устойчивость фанеры ФФСФ.

В связующем с ацетатом меди возникают колебания связей в группах $C=O$ в областях полос поглощения 1264 и 1016 cm^{-1} . Пики в области полосы поглощения около 1436 cm^{-1} характеризуют деформационные колебания связей в группах $-CH_2$, около 2944 cm^{-1} – валентные колебания связей в группах $-CH_2$. В связующем, модифицированном ацетатом меди, возникают дополнительные колебания (1473 cm^{-1}) связей в функциональных группах $C=C$, связанных с бензольным кольцом. Для связующего, модифицированного резорцинатом меди, выявлены дополнительные колебания связей в группах $-OH$ фенолоформальдегидной смолы в области полосы поглощения 1370 cm^{-1} [21]. Возможно, наличие этих групп является причиной того, что гидролитическая устойчивость связующего с резорцинатом меди ниже, чем у связующих, модифицированных ацетатом меди и резорцином.

Наши результаты близки к данным, представленным в работах других исследователей. Например, Taohong Li и группой исследователей теоретически обосновано ускорение поликонденсации ФФС с добавкой резорцина [20]. Во Zhao с коллегами доказали, что добавление резорцина увеличивает количество активных центров в молекулах смолы и снижает энергию активации, необходимую для отверждения [33].

На основании полученных данных было принято решение изготовить фанеру на ФФС с модифицирующими добавками (ацетат меди, резорцин, резорцинат меди) в условиях низкотемпературного прессования. Контрольные образцы фанеры модифицирующих добавок в связующем прессовались при температурах 105 и 120 °С.

Результаты определения показателей фанеры приведены в табл. 1, 2. Контрольные испытания для установления прочности фанеры при скалывании по клеевому слою выполнены в испытательной лаборатории древесных плит и фанеры.

Таблица 1

Прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после 1 ч кипячения, МПа
Plywood strength when shearing along the adhesive layer after 1 hour of boiling, MPa

Вид фанеры	Определение в КГУ		Определение в лаборатории	
	среднее арифметическое	среднее квадратическое отклонение	среднее арифметическое	среднее квадратическое отклонение
С ацетатом меди	2,02	0,22	1,84	0,21
С резорцином	1,93	0,37	1,83	0,39
С резорцинатом меди	1,72	0,24	1,65	0,31
Контроль 1 (температура прессования – 105 °С)*	1,13	0,33	–	–
Контроль 2 (температура прессования 120 °С)*	1,63	0,35	1,39	0,40

*Образцы, испытанные в КГУ.

Таблица 2

Прочность фанеры при статическом изгибе, МПа
Plywood strength under static bending, MPa

Вид фанеры	Среднее арифметическое	Среднее квадратическое отклонение
С ацетатом меди	150,4	7,03
С резорцином	150,9	6,95
С резорцинатом меди	117,8	6,20
Контроль 1	106,5	6,96
Контроль 2	144,8	6,02

Наилучшую прочность при скалывании по клеевому слою имеют образцы, изготовленные на ФФС, модифицированной ацетатом меди. Различия в средней прочности при скалывании незначительные в сравнении с результатами испытаний образцов на связующем, модифицированном резорцином, но среднее квадратическое отклонение для модификатора ацетата меди меньше почти в 2 раза. Данные наших испытаний подтверждаются результатами испытаний в лаборатории. При низкотемпературном прессовании (температура 105 °С) фанеры модификация ФФС ацетатом меди привела к увеличению прочности при скалывании по клеевому слою на 78,8 %, резорцином – на 70,0 %, резорцинатом меди – на 52,2 % в сравнении с показателем образцов, изготовленных на ФФС. Прочность фанеры при статическом изгибе максимальная для образцов с ацетатом меди и резорцином, она превышает показатель образцов, полученных при температуре 120 °С.

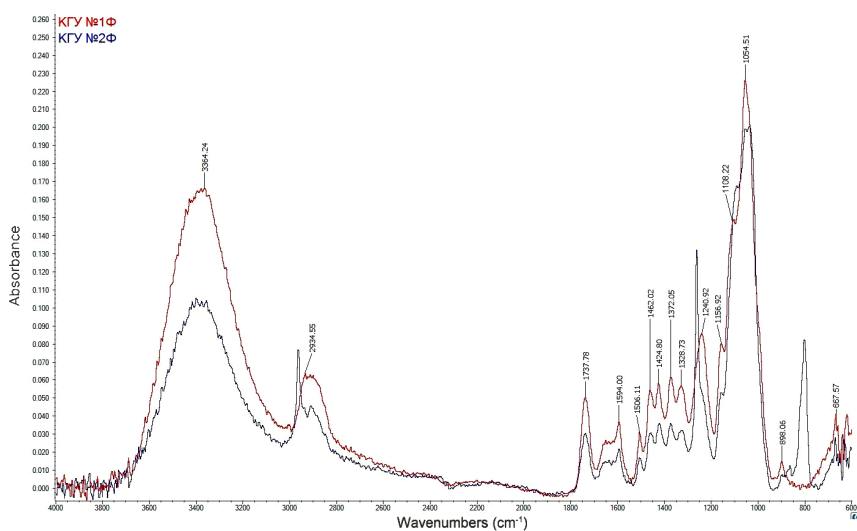
В ходе проведения работы снимались спектры твердых образцов фанеры ФФС, изготовленной с использованием модификаторов (ацетат меди, резорцин, резорцинат меди) и без них. ИК-спектры образцов фанеры, изготовленных на модифицированном связующем, в сравнении со спектром контрольного образца (без модификатора) представлены на рис. 2.

Пик в области полосы поглощения 3364 см⁻¹ в спектре фанеры характеризует валентные колебания связей в группах –ОН (участвующих во внутри- и межмолекулярных связях), причем, как и для связующего, сохраняется закономерность снижения количества Н-связей в образце фанеры с ацетатом меди в сравнении со спектром контрольного образца. Это наблюдается и в спектре образца связующего, модифицированного резорцинатом меди. Причиной этого, по мнению авторов, является образование координационных связей между ионом меди и гидроксильными группами фенолоформальдегидного связующего. Дополнительная сшивка сетки отвержденного фенолоформальдегидного полимера повышает его гидролитическую устойчивость, а следовательно, и прочность фанеры на модифицированном ацетатом меди клее при скалывании по клеевому слою после кипячения. Результаты испытаний фанеры на прочность при скалывании после кипячения также являются косвенным подтверждением формирования более прочной сетки фенолоформальдегидного полимера с добавкой ацетата меди. В случае прессования при температуре 105 °С прочность при скалывании фанеры на связующем, модифицированном ацетатом меди, в 1,79 раза (на 78,8 %) больше, чем показатель фанеры на смоле без модификатора (2,02 и 1,13 МПа). Возможно, отмеченный эффект является подтверждением выводов Li F. с коллегами [18] об участии ионов меди в создании связей

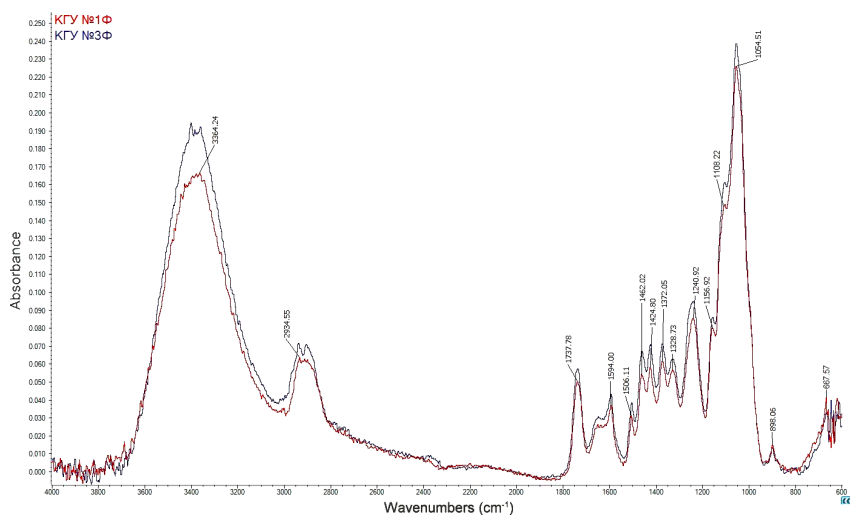
с элементами клеточных стенок древесины, т. к. для партии фанеры на связующем с добавкой ацетата меди при испытании наблюдается увеличение числа образцов со скалыванием по древесине.

В спектре образца на связующем, модифицированном резорцином, количество водородных связей больше, чем в спектре контрольного образца.

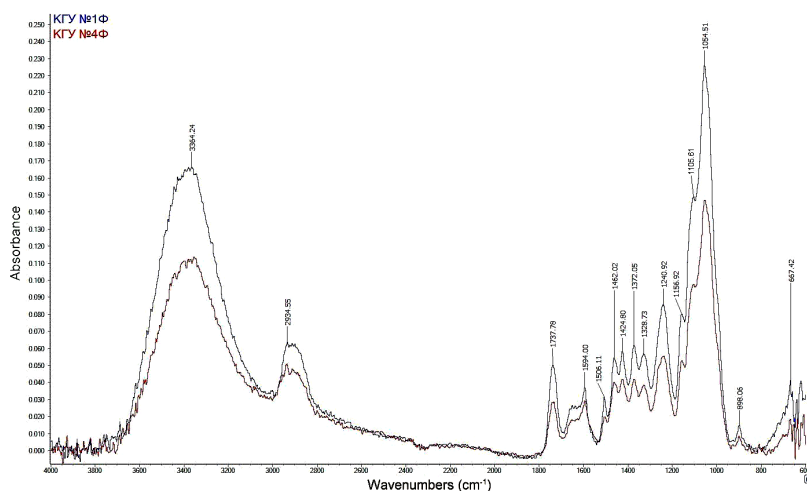
Пики в области полосы поглощения 1054 см^{-1} в спектрах образцов фанеры относятся к валентным колебаниям связей С-О в гидроксиметильных группах ФФС $-\text{CH}_2\text{OH}$ [21]. В спектре контрольного образца фанеры интенсивность поглощения составляет 0,225, для фанеры на связующем, модифицированном добавкой ацетата меди, – снижается до 0,2. В данной области спектров полоса поглощения 1054 см^{-1} расположена рядом с полосами поглощения $1108,0$ и $1156,9\text{ см}^{-1}$, которые относятся к валентным колебаниям связей С-О в полисахаридах древесины. К этим же связям принадлежит пик в области полосы поглощения 1060 см^{-1} , наложения пиков связей в разных компонентах фанеры видны на рис. 2.



а



б



6

Рис. 2. ИК-спектры твердых образцов фанеры ФСФ: *а* – образцов № 1Ф (контрольный образец) и 2Ф (образец с добавкой ацетата меди); *б* – образцов № 1Ф и 3Ф (образец с добавкой резорцина); *в* – образцов № 1Ф и 4Ф (образец с добавкой резорцината меди)

Fig. 2. IR spectra of solid waterproof plywood samples: *a* – samples no. 1Ф (reference sample) and 2Ф (sample with copper acetate added); *б* – samples no. 1Ф and 3Ф (sample with resorcin added); *в* – samples no. 1Ф and 4Ф (sample with copper resorcinate added)

Заклучение

Анализ спектров ФФС и твердых образцов фанеры ФСФ показал, что при модификации связующего солями меди уменьшается количество гидроксильных групп $-\text{OH}$, участвующих в межмолекулярных водородных связях, и уменьшается количество гидроксиметильных групп $-\text{CH}_2\text{OH}$, т. е. повышается гидролитическая устойчивость связующего. Это подтверждают и результаты определения прочности фанеры при скалывании по клеевому слою. При этом для связующего, модифицированного резорцином, количество гидроксильных групп практически не меняется, но увеличивается число групп $-\text{CH}_2-$.

Использование ацетата меди, резорцина и резорцината меди для модификации фенолоформальдегидной смолы при изготовлении фанеры в условиях низкотемпературного прессования (температура 105°C) позволяет значительно повысить прочность фанеры при скалывании по клеевому слою. Это обусловлено образованием координационных связей между ионом меди и гидроксильными группами фенолоформальдегидного связующего. Дополнительная сшивка сетки отвержденного фенолоформальдегидного полимера повышает его гидролитическую устойчивость.

Модификация ФФС ацетатом меди привела к увеличению прочности при скалывании по клеевому слою на 78,8 %, резорцином – на 70,0 %, резорцинатом меди – на 52,2 % в сравнении с прочностью контрольных образцов. Модификация смолы также обеспечивает высокую прочность фанеры при статическом изгибе, сопоставимую с прочностью фанеры, изготовленной при температуре прессования 120°C .

Использование ацетата меди для модификации смолы для фанеры, производимой при сниженной (до 105°C) температуре прессования обеспечивает

механические показатели фанеры, сопоставимые с показателями при использовании смолы, модифицированной резорцином, причем стоимость ацетата меди ниже, чем стоимость резорцина. Для промышленности при низкотемпературном прессовании можно рекомендовать модификацию смолы ацетатом меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.: Лань, 2021. 620 с.

Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2021. 620 p. (In Russ.).

2. Ерошенко В.Д., Фокин В.П., Овчинников А.Н., Ефименко А.А., Белянкина Л.М. Исследование кинетики процесса отверждения резольной фенолоформальдегидной смолы, модифицированной резорцином меди // Изв. вузов. Сев.-кавказ. регион. Техн. науки. 2019. № 2. С. 48–54.

Eroshenko V.D., Fokin V.P., Ovchinnikov A.N., Efimenko A.A., Belyankina L.M. Study of the Kinetics of the Process of the Curing of Reshonic Phenolomomedehide Resin Modified by Metal Salts. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, 2019, no. 2, pp. 48–54. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17213/0321-2653-2019-2-48-54>

3. Соколова Е.Г., Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Влияние аэросила технического на свойства клеевых композиций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 133–144.

Sokolova E.G., Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Effect of Technical Aerosil on the Properties of Adhesive Compositions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 133–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-133-144>

4. Тесленко А.Ю., Шишлов О.Ф., Глухих В.В., Ельцов О.С. Перспективные связующие для фанеры на основе эпоксидных систем с карданолсодержащими основаниями Манниха // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1(45). С. 85–90.

Teslenko A.Yu., Shishlov O.F., Glukhikh V.V., Yeltsov O.S. Advanced Binders for Plywood Based on Epoxy Systems with Mannich's Cardanol-Containing Bases. *Systems. Methods. Technologies*, 2020, no. 1(45), pp. 85–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-1-85-90>

5. Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., Титунин А.А. Моделирование показателей конкурентоспособных материалов для изготовления опалубки при строительстве промышленных зданий // Строит. материалы. 2024. № 12. С. 68–72.

Fedotov A.A., Vahnina T.N., Susoeva I.V., Titunin A.A. Modeling of Indicators of Competitive Materials for the Manufacture of Formwork in the Construction of Industrial Buildings. *Construction Materials*, 2024, no. 12, pp. 68–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-831-12-68-72>

6. Ющенко Е.В. Разработка инновационного способа повышения прочности и экологичности фанеры: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж. 2025. 245 с.

Yushchenko E.V. *Development of an Innovative Method for Improving the Strength and Environmental Friendliness of Plywood*: Cand. Engin. Sci. Diss. Voronezh, 2025. 245 p. (In Russ.).

7. Bekhta P., Sedliacik J. Environmentally-Friendly High-Density Polyethylene-Bonded Plywood Panels. *Polymers*, 2019, vol. 11, iss. 7, art. 1166. <https://doi.org/10.3390/polym11071166>

8. Biadała T., Czarnecki R., Dukarska D. Water Resistant Plywood of Increased Elasticity Produced from European Wood Species. *Wood Research*, 2020, vol. 65(1), pp. 111–124. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.1.111124>

9. Chen N., Huang J., Li K. Investigation of a Formaldehyde-Free Cottonseed Flour-Based Adhesive for Interior Plywood. *BioResources*, 2020, vol. 15(3), pp. 5546–5557. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5546-5557>

10. Choowang R., Luengchavanon M., Raknarong J. Employing a Mixture of Fine-Particle PKS, Glycerol, and Citric Acid as an Eco-Friendly Binder for Plywood Production from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) Veneer. *Journal of Wood Science*, 2024, vol. 70, art. 31. <https://doi.org/10.1186/s10086-024-02145-1>
11. Chrobak J., Howska J., Chrobok A. Formaldehyde-Free Resins for the Wood-Based Panel Industry: Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners. *Molecules*, 2022, vol. 27, iss. 15, art. 4862. <https://doi.org/10.3390/molecules27154862>
12. El Mansouri N., Yuan Q., Huang F. Preparation and Characterization of Phenol-Formaldehyde Resins Modified with Alkaline Rice Straw Lignin. *BioResources*, 2018, vol. 13(4), pp. 8061–8075. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.8061-8075>
13. Huzyan H.I., Abdul Aziz A., Hussin M.H. Ecofriendly Wood Adhesives from Date Palm Fronds Lignin for Plywood. *BioResources*, 2021, vol. 16(2), pp. 4106–4125. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.4106-4125>
14. Jorda J., Cesprini E., Barbu M.-C., Tondi G., Zanetti M., Král P. Quebracho Tannin Bio-Based Adhesives for Plywood. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 11, art. 2257. <https://doi.org/10.3390/polym14112257>
15. Kamke F.A., Irribarra L.M., Leavengood S. Dynamic Moisture Resistance of Chemical and Thermal Modified Plywood. *Wood Material Science and Engineering*, 2022, vol. 18, iss. 1, pp. 29–34. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2109990>
16. Karthäuser J., Raskop S., Slabohm M., Militz H. Modification of Plywood with Phenol-Formaldehyde Resin: Substitution of Phenol by Pyrolysis Cleavage Products of Softwood Kraft Lignin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2024, vol. 82, pp. 309–319. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02029-z>
17. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Siuda, J., Szentner K. The Effect of Nano-cellulose Addition to Phenol-Formaldehyde Adhesive in Water-Resistant Plywood Manufacturing. *BioResources*, 2020, vol. 15(3), pp. 5388–5401. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5388-5401>
18. Li F., Ye C., Huang Y., Liu X., Fei B. Incorporation of *in situ* Synthesized Nano-Copper Modified Phenol-Formaldehyde Resin to Improve the Mechanical Properties of Chinese Fir: A Preliminary Study. *Polymers*, 2021, vol. 13(6), art. 876. <https://doi.org/10.3390/polym13060876>
19. Li S., Wang C., Zhang X., Zou L., Dai Z. Classification and Characterization of Bound Water in Marine Mucky Silty Clay. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, vol. 19, pp. 2509–2519. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02242-5>
20. Li T., Cao M., Liang J., Xie X., Du G. Mechanism of Base-Catalyzed Resorcinol-Formaldehyde and Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Condensation Reactions: A Theoretical Study. *Polymers*, 2017, vol. 9(9), art. 426. <https://doi.org/10.3390/polym9090426>
21. Poljanšek I., Krajnc M. Characterization of Phenol-Formaldehyde Prepolymer Resins by In Line FT-IR Spectroscopy. *Acta Chimica Slovenica*, 2005, vol. 52, iss. 3, pp. 238–244.
22. Rusakov D.S., Varankina G.S., Belova O.A. Modification of Phenol Formaldehyde Resins with Wood-Pyrolysis Liquid. *Polymer Science, Series D*, 2024, vol. 17, pp. 242–246. <https://doi.org/10.1134/S1995421224700400>
23. Sibokoza S.B., Moloto M.J., Mtunzi F., Moloto N. Thermal Decomposition of Copper Acetate at Various Temperature and Time to form Copper Oxide/Copper Nanoparticles. *Asian Journal of Chemistry*, 2022, vol. 34, no. 1, pp. 239–244. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2022.23495>
24. Singh M., Kumar D., Thomas J., Ramanan A. Crystallization of Copper(II) Sulfate Based Minerals and MOF from Solution: Chemical Insights into the Supramolecular Interactions. *Journal of Chemical Sciences*, 2010, vol. 122, pp. 757–769. <https://doi.org/10.1007/s12039-010-0064-1>

25. Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinskiy A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. Estimation of Service Properties of Modified Synthetic Resins and Plywood Based on Them. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 9, pp. 10–15. <https://doi.org/10.31044/1813-7008-2020-0-9-10-15>

26. Varodi A.M., Beldean E.C., Timar M.C. Furan Resin as Potential Substitute for Phenol-Formaldehyde Resin in Plywood Manufacturing. *BioResources*, 2019, vol. 14(2), pp. 2727–2739. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.2727-2739>

27. *Wood Adhesives and Binders Market Report by Product Type (Urea-Formaldehyde, Melamine-Urea-Formaldehyde, Phenol-Formaldehyde, Isocyanates, Soy-Based, and Others), Application (Flooring Products, Furniture and Subcomponents, Windows and Doors, Cabinets, and Others), and Region 2025–2033*. 2025. Available at: <https://www.imarcgroup.com/wood-adhesive-binders-market> (accessed 20.06.26).

28. *Wood Adhesives and Binders Market Size & Share 2016 – 2024: A Report*. 2015. 128 p. Available at: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/wood-adhesives-and-binders-market> (accessed 20.06.26).

29. Yi T., Guo C., Zhao S., Zhan K., Gao W., Yang L., et al. The Simultaneous Preparation of Nano Cupric Oxide (CuO) and Phenol Formaldehyde (PF) Resin in One System: Aimed to Apply as Wood Adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2020, vol. 78, pp. 471–482. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01514-z>

30. Younesi-Kordkheili H., Pizzi A. Modification of Nanolignin by Deep Eutectic Solvent to Improve the Properties of Phenol-Formaldehyde Resin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2024, vol. 82, pp. 2099–2108. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02147-2>

31. Yu C., Chen Y., Li R., Jiang J., Wang X. A Narrative Review: Modification of Bio-Based Wood Adhesive for Performance Improvement. *Coatings*, 2024, vol. 14(9), art. 1153. <https://doi.org/10.3390/coatings14091153>

32. Zhang Y., Liu Y., Liu M., Li C. Preparation and Performance Study of Modified Silica Sol/Phenolic Resin. *BioResources*, 2021, vol. 16(4), pp. 6669–6683. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.6669-6683>

33. Zhao B., Leng Y., Xue M., Xue M., Zhang Q., Dong H., et al. Cure-Promoting Strategies for Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Resins: High-Ortho Catalysis, Hydrogen Bond Activation, and Their Impact on Curing Kinetics. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, vol. 142, iss. 25, art. e57047. <https://doi.org/10.1002/app.57047>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 662.81

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-171-180

Комплексный термический анализ торрефиката из древесины лиственницы

А.А. Громов[✉], аспирант; ResearcherID: [LQK-6780-2024](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

М.С. Иванов, аспирант; ResearcherID: [NGS-2813-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9507-5496>

П.Д. Алексеев, зав. лаб.; ResearcherID: [KBA-5698-2024](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0468-2101>

П.А. Марьяндышев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [E-7880-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; gromov.a@edu.narfu.ru[✉], ivanov_ms@vk.com, p.alekseev@narfu.ru, p.marjandyshhev@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.08.25 / Одобрена после рецензирования 08.11.25 / Принята к печати 11.11.25

Аннотация. Производство торрефиката – это стратегически важное направление для диверсификации продукции лесного комплекса РФ. Торрефикат получают термохимическим преобразованием биомассы в среде с ограниченным содержанием кислорода. Преимущества торрефиката по сравнению с исходной биомассой – это высокие энергетическая плотность, гидрофобность и устойчивость к биологическому разложению. Цель исследования – комплексный термический анализ энергетического потенциала и характеристик термодеструкции торрефицированного биотоплива из древесины лиственницы. Приведена характеристика торрефиката, его элементный и компонентный состав, содержание оксидов металлов. Пиролитическая газовая хроматография-масс-спектрометрия идентифицировала основные органические соединения в составе пиролизных паров при 5 температурных режимах обработки (от 200 до 600 °С с шагом 100 °С). Методами термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии в инертной (аргон) и воздушной средах при скорости нагрева 10 °С/мин установлены температурные диапазоны процессов потери массы влаги и горения топлива и коксового остатка. Выход высококалорийных компонентов и наибольшее тепловыделение наблюдаются в интервале температур 400–500 °С. Установлено, что торрефикация позволяет получить топливо с повышенной энергетической эффективностью и улучшенными топливными характеристиками в сопоставлении с цельной древесиной. Результаты имеют практическую значимость для оценки перспектив использования торрефиката в качестве высококалорийного твердого биотоплива для энергетической утилизации на биотопливных котельных в Арктическом регионе и дают основу для исследований в данном направлении.



Ключевые слова: древесина лиственницы, лесопромышленный комплекс, торрефикат, газохроматография, пиролиз, термогравиметрия

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Благодарности: Использовано научное оборудование центра коллективного пользования «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Громов А.А., Иванов М.С., Алексеев П.Д., Марьяндышев П.А. Комплексный термический анализ торрефиката из древесины лиственницы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 171–180. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-171-180>

Original article

Comprehensive Thermal Analysis of Torrefied Larch Wood

Anton A. Gromov[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

Michael S. Ivanov, Postgraduate Student; ResearcherID: [NGS-2813-2025](https://orcid.org/0009-0002-9507-5496),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9507-5496>

Pavel D. Alekseev, Head of Laboratory; ResearcherID: [KBA-5698-2024](https://orcid.org/0000-0003-0468-2101),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0468-2101>

Pavel A. Maryandyshev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia;
gromov.a@edu.narfu.ru[✉], ivanov_ms@vk.com, p.alekseev@narfu.ru,
p.maryandyshev@narfu.ru

Received on August 10, 2025 / Approved after reviewing on November 8, 2025 / Accepted on November 11, 2025

Abstract. The production of torrefied biomass is a strategically important area for diversifying the Russian forestry sector's product range. Torrefied biomass is produced by the thermochemical biomass conversion in an oxygen-limited environment. High energy density, hydrophobicity, and resistance to biological degradation are among the advantages of torrefied biomass over raw biomass. The research is aimed at carrying out a comprehensive thermal analysis of the energy potential and thermal degradation parameters of torrefied biofuel produced from larch wood. The paper presents the characteristics of torrefied biomass, its elemental and compositional structure, and its metal oxide content. Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry determined the main organic compounds present in pyrolysis vapors at five different temperature settings (ranging from 200 to 600 °C with a 100 °C step) during processing. The temperature ranges for moisture loss and the combustion of fuel and coke residue were determined using thermogravimetry and differential thermogravimetry in an inert (argon) and air atmosphere at a heating rate of 10 °C/min. The release of high-calorie components and the greatest heat release occur in the 400–500 °C temperature range. It has been found that torrefaction produces a fuel with higher energy efficiency and improved fuel properties compared to solid wood. The results have practical significance for assessing the potential of torrefied biomass as a high-

calorific-value solid biofuel for energy recovery at biofuel boiler plants in the Arctic region and provide a basis for further research in this area.

Keywords: larch wood, forest industry complex, torrefied biomass, gas chromatography, pyrolysis, thermogravimetry

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FSRU-2024-0007.

Acknowledgments: The Core Facility Center “Arktika” at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov provided the scientific equipment for the research.

For citation: Gromov A.A., Ivanov M.S., Alekseev P.D., Maryandyshev P.A. Comprehensive Thermal Analysis of Torrefied Larch Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 171–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-171-180>

Введение

Лесопромышленный комплекс – один из основных секторов экономики Северо-Западного региона [4]. В число направлений производства здесь входит изготовление древесных гранул (пеллет). В «Стратегии лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» прогнозировался рост рынка и увеличение доли экспорта пеллет. Однако за 4 года производство пеллет снизилось с 1164 тыс. т в 2021 г. до 299 тыс. т в 2024 г. Ранее они поставлялись в страны Европейского союза (ЕС) для обеспечения топливом крупных энергетических станций, но в связи с ограничениями поставок в страны ЕС из-за санкций произошел разрыв глобальных логистических цепочек между производителем и конечным потребителем и в настоящее время идет переориентация на азиатские рынки. Региону необходимы проекты, направленные на создание продуктов с высокой добавленной стоимостью [2, 4, 5].

Представляет интерес производство древесного торрефицированного брикета. Торрефикат изготавливают путем термохимического преобразования биомассы (торрефикацией или медленным пиролизом) в среде с ограниченным содержанием кислорода. Преимущества торрефиката перед исходной биомассой заключаются в высокой энергетической плотности, гидрофобности и устойчивости к биологическому разложению [7].

Технологии получения торрефиката приведены в специализированной литературе и классифицированы по типу реактора, способу нагрева и используемому теплоносителю [3, 6, 14, 16–18]. В большинстве исследований в качестве исходного материала берут щепу, опилки и сельскохозяйственные отходы, которые затем подвергают грануляции. Это значительно сокращает время нагрева сырья, но усложняет процесс грануляции из-за необходимости добавления связующих веществ и увеличенного износа пресс-грануляторов [20]. Альтернативой является торрефикация измельченной биомассы с последующим брикетированием или грануляцией уже полученного биоугля, что снижает износ оборудования [11]. При использовании готовых древесных пеллет требования к конструкции реактора возрастают. Необходимо учитывать механическую прочность пеллет и минимизировать количество подвижных элементов в реакторе [20].

Пиролитическая газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС) эффективна в процессе изучения пиролиза биомассы и необходима для опре-

деления фундаментальных механизмов термического разложения лигноцеллюлозного комплекса, изучения кинетики процессов и оптимизации режимов термообработки для получения продукта с заданными свойствами [10, 19]. С помощью пиролитической ГХ-МС анализируют химический состав и распределение продуктов пиролиза и механизмы их разложения. Продукты пиролиза делятся на категории: алифатические соединения, ароматические углеводороды, фенолы, фураны, альдегиды, кислоты, кетоны, ангидросахара и азотсодержащие гетероциклические соединения. Распределение продуктов пиролиза зависит от типа биомассы и условий эксперимента. Для торрефикации, протекающей в диапазоне температур 200–300 °С, характерно преимущественное образование твердого продукта с сохранением структуры сырья, в то время как жидкие и газообразные продукты являются побочными [8, 9]. Многоступенчатый подход с короткими температурными интервалами предоставляет подробную информацию о продуктах на каждом этапе, что помогает лучше понять механизмы разложения при различных температурах [10]. Это особенно важно для разработки многостадийных процессов, например, комбинирующих торрефикацию и последующий пиролиз для максимального выхода целевых продуктов [15].

Производство торрефиката представляет собой стратегически важное направление для диверсификации продукции лесного комплекса РФ. Реализация комплексного подхода требует фундаментальных исследований процессов термического разложения, разработки эффективного оборудования и оценки экономической целесообразности [12].

Целью данной работы является изучение процессов термического разложения торрефицированного брикета из древесины лиственницы методами пиролитической ГХ-МС, термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии.

Объекты и методы исследования

В качестве исходной пробы принят торрефицированный брикет из древесины лиственницы (далее – проба). Формирование объединенных проб, их сокращение, измельчение и деление выполнены в соответствии с ГОСТ Р 50801–95, 55660–2013, 52917–2008, 55661–2013.

Результаты теплотехнического анализа пробы следующие: зольность – 0,60 %; влажность – 3,50 %; содержание летучих веществ – 83,31 %; низшая теплота сгорания – 18,20 МДж/кг. Установлено, что проба имеет низкую зольность, а низшая теплота сгорания соответствует древесным пеллетам [1].

Определение элементного состава пробы проводили на автоматизированном анализаторе Euro EA-3000. Элементный анализ основан на высокотемпературном сжигании пробы в присутствии кислорода при температуре 980 °С с последующим газохроматографическим разделением и детектированием продуктов сгорания при помощи высокочувствительного катарометрического детектора.

Рентгенофлуоресцентную спектроскопию пробы проводили на анализаторе EDX-8000. Результаты рентгенофлуоресцентной спектроскопии исследуемой пробы сведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав пробы в пересчете на сухую массу
Sample composition calculated with reference to dried substance

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
C	52,50	Na	0,133
O	40,70	Mg	0,050
H	6,24	Cu	0,003
S	0,017	Al	0,014
Fe	0,019	Mn	0,012
K	0,050	Zn	0,001
Ca	0,146	P	0,019
Si	0,029	N	<0,1

Термогравиметрический анализ провели на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter. Прибор объединяет в себе дифференциальный сканирующий калориметр теплового потока и термомикровесы с разрешением в диапазоне 1 мкг. Для нагревания используют высокотемпературную печь с нагревательным элементом из карбида кремния (SiC), позволяющим достигать температуры 1550 °С.

Эксперименты выполнены в динамическом режиме – камеру во время измерения постоянно продували либо воздухом, либо аргоном (99,995 %) со скоростью 20 мл/мин. Камеры термовесов продували потоком защитного газа (аргона). В инертной среде перед началом эксперимента из камеры полностью откачивали воздух до вакуума давлением 10⁻² мбар, затем проводили выпуск аргона. Цикл откачка–выпуск повторили 2 раза.

Навеску пробы массой 5 мг поместили в тигель из Al₂O₃. Измерения провели при нагревании от 40 до 800 °С при скорости нагрева 10 °С/мин. В качестве образца сравнения использован пустой тигель. Управление системой, сбор и обработку данных осуществляли с помощью программного обеспечения Netzsch-Proteus.

Пиролитическую ГХ-МС выполнили на приборе GCMS-QP2010Plus, оборудованном пиролизером EGA/PY-3030D. Масса пробы для пиролитической ГХ-МС – 296 мкг. Навеска пробы подвержена разложению в среде азота с использованием пиролизера EGA/PY-3030D (Frontier Lab) с криоловушкой.

Пиролиз проведен в газовой среде (азот), режим работы – Single Shot (однократный пиролиз), шаг температуры при измерениях – 100 °С, диапазон – 200–600 °С. Начальная температура нагрева – 30 °С.

С целью определения влияния температуры на выход и свойства продуктов пиролиза выполнены эксперименты при постоянной температуре с использованием 1 пробы и ее последовательным нагревом до заданных температур.

Условия хроматографирования: колонка капиллярная HP-5MS, диаметр – 0,25 мм, толщина неподвижной фазы – 0,25 мкм, длина колонки – 30 м, ввод пробы с делением потока – 1:100, температура устройства ввода – 280 °С, газ-носитель – гелий, управление потоком газа – постоянное давление, скорость прохождения потока через колонку – 1 мл/мин.

Температурную программу термостата начинали с 30 °С, удерживали в течение 5 мин, далее повышали со скоростью 5 °С/мин до 200 °С. Температуру сопряжения с масс-детектором – 280 °С, температура ионного источника –

230 °С, энергия ионизации – 70 эВ, напряжение на детекторе – 0,9 кВ (по результатам автонастройки), масс-детектор работал в режиме сканирования масс-спектра (TIC Scan) в диапазоне 15–600 а.е.м.

На хроматограммах в виде пиков отображены выделяемые в процессе пиролиза компоненты [10]. В работе приведены компоненты, идентифицированная относительная площадь пиков которых составила более 0,31 %. Идентификация продуктов пиролиза осуществлена сравнением полученных масс-спектров Wiley-2010 и Nist-2011. Критерием положительной идентификации принята степень совпадения с библиотечным спектром 80 %. Также использовали приведенные в литературе параметры [13] по времени удерживания и масс-спектрам продуктов пиролиза растительных компонентов. Для оценки содержания идентифицированных компонентов применяли площадь пиков по полному ионному току.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены термограммы в виде кривых ТГ и ДТГ, полученные в инертной и воздушной средах, характеризующие ход процесса термического разложения и окисления пробы.

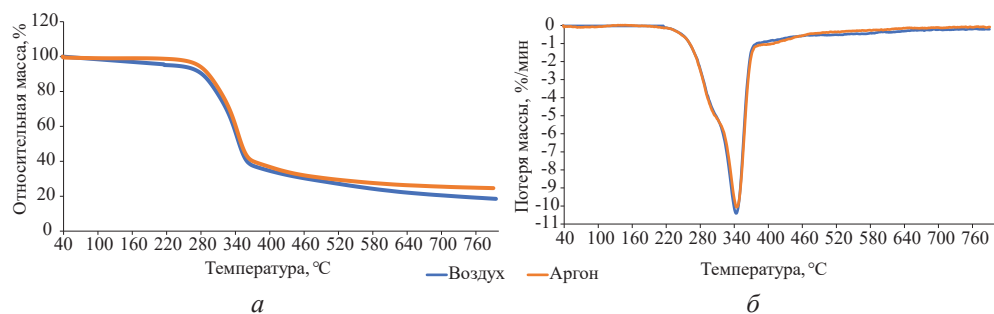


Рис. 1. Термограммы изменения массы пробы (а) и скорости потери массы пробы (б) при скорости нагрева 10 °С/мин в инертной и воздушной средах

Fig. 1. Thermograms showing changes in sample mass (a) and the rate of mass loss (b) at a heating rate of 10 °C/min in inert and air media

При ТГ и ДТГ в инертной и воздушной средах выделили 3 основных зоны. Диапазон температур 40–220 °С характеризуется потерей массы влаги. Диапазон температур 220–445 °С – выходом летучих веществ, образец теряет до 67 % массы. Точка экстремума выхода летучих веществ в среде приходится на 344 °С, в воздушной – на 343 °С. Диапазон наиболее активного выхода летучих веществ – 300–380 °С. Третья зона – 445 °С и выше – для этой зоны свойствен выход остатка летучих веществ и горение коксового остатка. Остаточная масса пробы при термическом разложении в инертной среде – 24,6 %, в воздушной – 18,5 %.

Хроматограммы пробы по полному ионному току представлены на рис. 2. Они позволяют качественно оценить выделяемые при пиролизе вещества, не давая возможности говорить о точных объемах выделяемых при пиролизе веществ.

При нагреве образца до 200 °С обнаружили 2 компонента: воду и диоксид углерода. Доминирует вода, что говорит о потере массы влаги, а присутствие CO_2 указывает на начало процесса термического разложения.

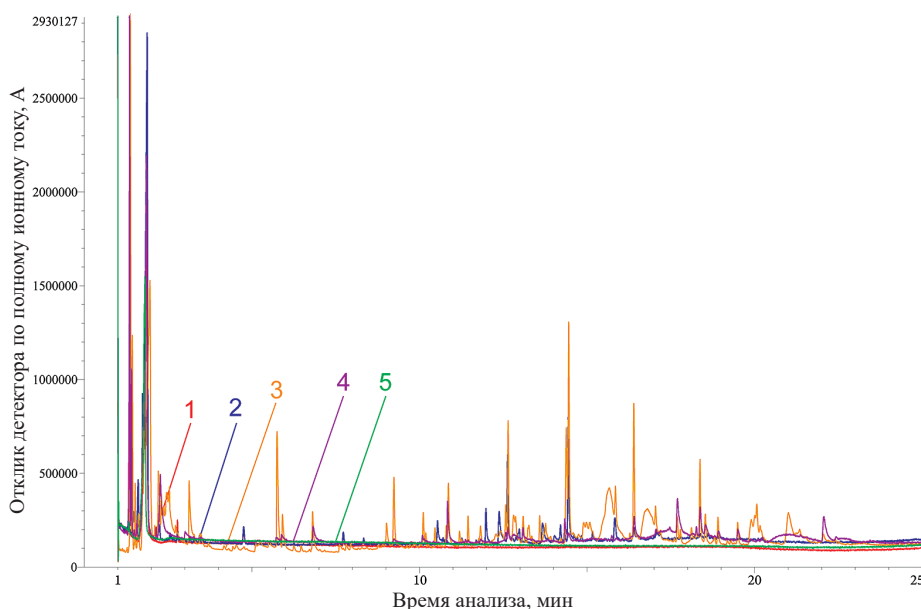


Рис. 2. Ионные хроматограммы пробы при различных температурах, °С:
1 – 200; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600

Fig. 2. Ion chromatograms of the sample at various temperatures, °C:
1 – 200; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600

При температуре 300 °С выявили 4 основных активных компонента: воду, диоксид углерода, уксусную кислоту и 2-бутанон. Нагрев образца до 300 °С сопровождается началом выделения летучих компонентов. Образование уксусной кислоты и 2-бутанона свидетельствует о деструктивных процессах в органической матрице. Появление данных соединений также указывает на начальную стадию процесса пиролиза, термическое разложение сложных полимеров, начало разложения биополимеров (целлюлозы и лигнина). Происходит термохимическое разложение, в результате которого образуются более сложные летучие соединения. Начинается разложение легковоспламеняющихся компонентов: сахаров и летучих соединений.

При температуре 400 °С в пробе выявили следующие компоненты: воду, диоксид углерода, 2-оксопропаналь (метилглиоксаль), креозол, 2-оксопропановую кислоту (метиловый эфир), 2-метокси-4-винилфенол, 2-метоксифенол, дибутилэтиламин, 1,2-циклопентандион, гидроксиэтаналь.

Выделение 2-оксопропанала свидетельствует о разложении углеводов. Креозола и 2-метоксифенола – лигнина и фенольных соединений. Наличие гидроксиэтанола свидетельствует об активном расщеплении сахаров и альдегидов.

При температуре пиролиза 500 °С обнаружили 7 основных пиков: воду, ацетон, креозол, 2-метоксифенол, 3-метилфенол, метанол, 2-метилфенол. Встречаются и другие фенольные соединения, такие как диметилфенолы, ароматические углеводороды, производные фурана. На данной стадии завершается выход летучих веществ и начинается образование угля.

Для линии на хроматограмме, соответствующей температуре 600 °С, свойственны 3 основных пика: вода, диоксид углерода и бензол. На данном этапе пиролиза образуется уголь с высокой плотностью. Большая часть летучих веществ уже удалена, что подтверждается меньшим количеством пиков

выделяемых веществ. С продолжением пиролиза увеличивается доля угля в образце.

Химический состав продуктов пиролиза по основным пикам на хроматограммах приведен в табл. 2.

Таблица 2

**Химический состав основных продуктов пиролиза пробы
(площади пиков на хроматограмме), %
Chemical composition of the main pyrolysis products of the sample
(peak areas on the chromatogram), %**

Вещество	Химический состав при температуре, °С				
	200	300	400	500	600
Диоксид углерода	0,77	12,85	7,37	1,35	1,24
Вода	99,23	32,90	12,68	54,25	94,20
Уксусная кислота	—	7,75	1,79	—	—
2-бутанон	—	7,12	0,23	—	—
2-оксопропаналь	—	—	7,14	—	—
Креозол	—	0,44	4,46	6,98	—
Метил 2-оксопропаноат	—	—	3,13	—	—
2-метокси-4-винилфенол	—	1,25	2,71	0,77	—
2-метоксифенол	—	0,58	2,24	4,47	—
Дибутилэтиламин	—	—	1,52	—	—
1,2-циклопентандион	—	—	1,54	—	—
Гидроксиэтаналь	—	—	1,68	—	—
Ацетон	—	—	—	7,08	—
3-метилфенол	—	—	—	3,51	—
Метанол	—	—	—	2,69	—
2-метилфенол	—	—	—	2,29	—
Бензол	—	—	—	0,31	2,02

Заключение

Приведены результаты термического разложения торрефицированного брикета из древесины лиственницы.

Методами термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии установили 3 стадии разложения образца древесины, характерные для биотоплив. Определен температурный диапазон наибольшего тепловыделения, сопровождаемого активным выходом летучих веществ: от 300 до 380 °С. Остаточная масса образца – 24,6 % в инертной и 18,5 % в воздушной средах.

Методом пиролитической газовой хроматографии-масс-спектрометрии определили состав продуктов пиролиза. Установлено, что при температуре процесса 200 °С наблюдается потеря влаги, в диапазоне от 300 до 500 °С – активное выделение альдегидов, эфиров и фенолов, а при 600 °С образуется уголь.

Доказано, что торрефицированный брикет из древесины лиственницы имеет хорошую реакционную и теплотворную способность и может быть рекомендован для эффективного применения в топочных устройствах котельных агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185.
Lyubov V.K., Tsypnyatov I.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 172–185. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>
2. Мураев И.Г., Сушко О.П. Диверсификация экспорта лесного комплекса Архангельской области // Арктика и Север. 2025. № 58. С. 47–64.
Muraev I.G., Sushko O.P. Export Diversification of the Arkhangelsk Oblast's Forestry Complex. *Arktika i Sever* = Arctic and North, 2025, no. 58, pp. 47–64. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.58.47>
3. Самойлова Ю.В., Сорокина К.Н., Пармон В.Н. Биоуголь из микроводорослей: подходы к получению и свойства // Катализ в промышленности. 2024. Т. 24, № 3. С. 83–90.
Samoylova Y.V., Sorokina K.N., Parmon V.N. Biochar from Microalgae: Production and Properties. *Kataliz v promyshlennosti*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 83–90. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18412/1816-0387-2024-3-83-90>
4. Терентьева В.Д. Перспективы развития лесопромышленного комплекса РФ в условиях санкций // Бизнес. Образование. Право. 2022. № 3(60). С. 203–208.
Terenteva V.D. Prospects for the Development of the Timber Industry of the Russian Federation in the Conditions of Sanctions. *Business. Education. Law*, 2022, no. 3(60), pp. 203–208. (In Russ.). <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2022.60.378>
5. Шишелов М.А., Стыров М.М. Адаптация лесного комплекса Республики Коми к санкционному давлению // Проблемы прогнозирования. 2024. № 5. С. 191–202.
Shishelov M.A., Styrov M.M. Adaptation of the Forest Complex of the Komi Republic to Sanctions Pressure. *Studies on Russian Economic Development*, 2024, vol. 35, no. 5, pp. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S107570072470028X>
6. Alias A.B., Wan Azlina W.A.K.G. Char and Biochar Production: Technology, Applications, and Major Challenges. *Char-based Composites*. Ed. by W.A.K.G. Wan Azlina, S.M. Sapuan, M.M. Harussani. Woodhead Publishing, 2025, pp. 33–47.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15403-4.00002-2>
7. Bergman P.C., Boersma A.R., Zwart R.W.R., Kiel J.H.A. *Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations*. The Netherlands, 2005. 75 p.
8. Chen W.-H., Peng J., Bi X.T. A State-of-the-Art Review of Biomass Torrefaction, Densification and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 44, pp. 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
9. Chen W.-H., Ye S.-C., Sheen H.-K. Hydrothermal Carbonization of Sugarcane Bagasse via Wet Torrefaction in Association with Microwave Heating. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 118, pp. 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.101>
10. Hao J., Xu F., Yang D., Wang B., Qiao Y., Tian Y. Analytical Pyrolysis of Biomass Using Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, vol. 208, art. 115090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115090>
11. Krylova A.Yu., Gorlov E.G., Shumovskii A.V. Production of Biocoal by the Pyrolysis of Biomass. *Solid Fuel Chemistry*, 2019, vol. 53, pp. 369–376.
<https://doi.org/10.3103/S0361521919060107>
12. Krylova A.Y., Zaitchenko V.M. Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Review. *Solid Fuel Chemistry*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 91–103.
<https://doi.org/10.3103/S0361521918050056>
13. Lin S.Y., Dence C.W. *Methods in Lignin Chemistry*. Berlin, Springer, 1992. 578 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7>
14. Liu Z., Zhang F.-S. Removal of Lead from Water Using Biochar's Prepared from Hydrothermal Liquefaction of Biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 167, iss. 1-3, pp. 933–939. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.085>

15. Liu Z., Zhang F.-S., Wu J. Characterization and Application of Chars Produced from Pinewood Pyrolysis and Hydrothermal Treatment. *Fuel*, 2010, vol. 89, iss. 2, pp. 510–514. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.042>

16. Safarian S. Performance Analysis of Sustainable Technologies for Biochar Production: A Comprehensive Review. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 4574–4593. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.111>

17. Seow Y.X., Tan Y.H., Mubarak N.M., Kansedo J., Khalid M., Ibrahim L.M., et al. A Review on Biochar Production from Different Biomass Wastes by Recent Carbonization Technologies and Its Sustainable Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, iss. 1, art. 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017>

18. van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A., Ptasinski K.J. Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, iss. 9, pp. 3748–3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>

19. Wang S., Dai G., Yang H., Luo Z. Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Mechanism: A State-of-the-Art Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, vol. 62, pp. 33–86. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>

20. Yildiz M.J., Wurzer C., Robinson T., Wietecha J., Mašek O. Biochar from Pellets: Influence of Binders and Pyrolysis Temperature on Physical Properties of Pyrolyzed Pellets. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, vol. 43, art. e01327. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01327>

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

Научная статья

УДК 676.164

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-181-192

Образование минеральных отложений в варочных установках «Камюр»

В.В. Медведев[✉], *мл. науч. сотр.*; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

Ю.В. Севастьянова, *канд. техн. наук, проф.*; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

А.В. Гурьев, *канд. техн. наук, проф.*; ResearcherID: [H-1586-2019](https://orcid.org/0000-0002-3372-3286),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>

А.В. Поташев, *канд. техн. наук, науч. сотр.*; ResearcherID: [H-1601-2019](https://orcid.org/0000-0002-7184-8338),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7184-8338>

А.С. Лыжина, *инженер*; ResearcherID: [PGT-6856-2026](https://orcid.org/0009-0003-9144-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9144-0078>

А.В. Скорнякова, *инженер*; ResearcherID: [LSI-9727-2024](https://orcid.org/0009-0003-8947-1617),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8947-1617>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; v.medvedev@narfu.ru[✉], j.sevastyanova@narfu.ru, a.guriev@narfu.ru, a.potashhev@narfu.ru, lyzhina.a@edu.narfu.ru, a.skornyakova@narfu.ru

Поступила в редакцию 27.01.26 / Одобрена после рецензирования 25.03.26 / Принята к печати 26.03.26

Аннотация. Образование минеральных отложений является одной из основных причин вынужденных остановов варочных установок типа «Камюр». В настоящее время применение ингибиторов является одним из наиболее эффективных и дорогостоящих методов борьбы с солеотложениями. Именно поэтому правильный подбор ингибитора и его дозировки необходимы для достижения бесперебойной и экономически целесообразной работы оборудования. При этом требуется установление природы минеральных отложений и уровня содержания вызывающих их веществ. Результаты анализа образцов минеральных отложений варочных установок непрерывного действия типа «Камюр», отобранных на двух различных производствах действующего целлюлозно-бумажного предприятия Российской Федерации во время вынужденных остановов, подтвердили, что углекислый кальций является их основным компонентом. Преобладающим процессом, приводящим к образованию карбонатных кальциевых отложений в условиях варки целлюлозы, является взаимодействие ионов кальция и карбонат-ионов. Неустраняемый источник карбонат-иона – белый щелок. Катион кальция в большем количестве поступает с древесиной (до 1,6 кг/т а.с.в), в меньшем – с белым щелоком (вследствие длительности реакции каустизации), и наименее значительно – со слабым черным щелоком, направляемым для поддержания гидромодуля варочного котла. Представлены уровни варьирования содержания карбоната натрия и катионов кальция в используемом сырье, их часовое поступление с учетом реальной производительности варочных установок и укрупненный баланс по кальцию для обследованных варочных установок непрерывного действия типа «Камюр» на производстве лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы.

Ключевые слова: минеральные отложения, варочные установки, варочные установки типа «Камюр», сульфатная целлюлоза, жесткость воды, белый щелок, карбонат кальция

© Медведев В.В., Севастьянова Ю.В., Гурьев А.В., Поташев А.В., Лыжина А.С., Скорнякова А.В., 2026



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

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2026-0003.

Благодарности: Использовано оборудование ИТЦ СТПБС и ЦКП НО «Арктика» САФУ им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Медведев В.В., Севастьянова Ю.В., Гурьев А.В., Поташев А.В., Лыжина А.С., Скорнякова А.В. Образование минеральных отложений в варочных установках «Камюр» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 181–192. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-181-192>

Original article

Formation of Mineral Deposits in Kamur Digesters

Vasilii V. Medvedev[✉], Junior Research Scientist; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

Yulia V. Sevastyanova, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

Alexander V. Guriev, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [H-1586-2019](https://orcid.org/0000-0002-3372-3286),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>

Alexander V. Potashev, Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [H-1601-2019](https://orcid.org/0000-0002-7184-8338), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7184-8338>

Anna S. Lyzhina, Engineer; ResearcherID: [PGT-6856-2026](https://orcid.org/0009-0003-9144-0078),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9144-0078>

Anastasiya V. Skorniyakova, Engineer; ResearcherID: [LSI-9727-2024](https://orcid.org/0009-0003-8947-1617),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8947-1617>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; v.medvedev@narfu.ru[✉], j.sevastyanova@narfu.ru, a.guriev@narfu.ru, a.potashev@narfu.ru, lyzhina.a@edu.narfu.ru, a.skorniyakova@narfu.ru

Received on January 27, 2026 / Approved after reviewing on March 25, 2026 / Accepted on March 26, 2026

Abstract. Mineral deposits are one of the main causes of unplanned shutdowns of Kamur digesters. Currently, the use of inhibitors is one of the most effective and expensive methods for dealing with salt deposits. Therefore, the correct selection of an inhibitor and its dosage is essential for ensuring the smooth and cost-effective operation of the equipment. This requires determining the nature of mineral deposits and the concentration of the substances that cause their formation. We analyzed the mineral deposit samples from the continuously working Kamur digesters selected at two different production lines of an operating pulp and paper mill in the Russian Federation during forced shutdowns. The analysis results confirmed that calcium carbonate is the main component of the deposits. The predominant process leading to the formation of calcium carbonate deposits during the pulp cooking process is the interaction of calcium ions and carbonate ions. White liquor is an unavoidable source of carbonate ions. Calcium cations are introduced in large quantities with wood (up to 1.6 kg/t of dry matter), in smaller quantities with white liquor (due to the prolonged causticization), and in even smaller quantities with weak black liquor, which is used to maintain the digester's water level. The paper presents the variation in sodium carbonate and calcium cation content in the raw materials used, their hourly intake considering the actual performance of digesters,

and a consolidated calcium balance for the examined continuously working Kamur digesters at the production of hardwood and softwood sulfate pulp.

Keywords: mineral deposits, digesters, Kamur digesters, sulphate pulp, water hardness, white liquor, calcium carbonate

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSRU-2026-0003.

Acknowledgments: The Core Facility Center “Arktika” and the Innovation and Technology Centre “Modern Technologies for Processing Northern Bioresources” at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov provided the scientific equipment for the research.

For citation: Medvedev V.V., Sevastyanova Yu.V., Guryev A.V., Potashev A.V., Lyzhina A.S., Skornyakova A.V. Formation of Mineral Deposits in Kamur Digesters. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 181–192. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-181-192>

Введение

В настоящее время около 65 % производимой в мире сульфатной целлюлозы получают на установках непрерывного действия типа «Камюр», производительность которых может превышать 1000 т/сут. [3, 7]. Простои снижают выработку, что ведет к экономическим потерям. В связи с этим необходимо обеспечивать стабильную работу всей системы варочной установки между плановыми остановами.

Образование минеральных отложений является одной из основных причин вынужденной остановки оборудования. Соли различных металлов оседают плотным слоем на внутренних поверхностях, контактирующих с варочными реагентами, снижая эффективность процесса вплоть до полного выведения устройства из строя. Отложения на греющих поверхностях уменьшают коэффициент теплопередачи, вызывают локальную коррозию и приводят к местным перегревам. При накоплении балластных осадков в трубопроводах и на поверхности сит происходит местное сужение их диаметра, которое приводит к резкому перепаду давления. В результате на транспортирование растворов требуется большее количество энергии, а работа перекачивающего оборудования в таком режиме сокращает срок его эксплуатации.

Вынужденное прекращение работы варочной установки вследствие образования минеральных отложений приводит к необходимости проведения регламентных процедур по опорожнению котла, очистки линий путем промывки растворами соляной кислоты.

Осаждение минеральных солей происходит в результате 3 взаимосвязанных процессов: перенасыщения раствора, нуклеации и роста кристаллов. Скорость данных процессов теоретически зависит от температуры, давления, pH среды, концентрации ионов и режимов движения жидкости [1, 19, 20].

При этом очевидно, что изменение температуры, давления и расходов щелочов в условиях поддержания постоянного технологического режима варочных установок на целлюлозно-бумажных предприятиях крайне незначительно. Вследствие этого, в производственных условиях практически выделяют лишь один основной параметр – концентрацию ионов, – стабилизация которого может снизить интенсивность образования минеральных отложений.

Источниками минеральных солей в системе варочного котла являются технологическая щепка, свежая вода и варочные растворы [2, 13]. Несмотря на то, что наибольшее количество минеральных веществ поступает в котел с древесиной, управление химическим составом сырья на сегодняшний день является крайне сложной задачей. Вместе с тем возможным остается осуществление контроля качества технической воды и белого щелока в таких технологических процессах, как водоподготовка и регенерация химикатов [5].

Основным способом предотвращения образования минеральных отложений на предприятиях ЦБП является применение ингибиторов солеотложений. Обычно в качестве антискалантов используют полифосфаты, фосфонаты и поликарбоксилаты. Также для ингибирования образования отложений можно применять аминокарбоксилаты (хелатообразующие вещества), например, этилендиаминтетрауксусную или диэтиленetriаминтетрауксусную кислоты. Однако они главным образом действуют за счет образования комплексов с кальцием в растворе. Это непрактично, поскольку такой процесс требует стехиометрического содержания ионов кальция и, следовательно, неэкономичен при их высоком уровне. Полифосфаты, фосфонаты и поликарбоксилаты эффективны при гораздо меньших расходах.

Ингибиторы, действующие в дозировках ниже стехиометрического уровня, часто называют «пороговыми ингибиторами» [10, 15]. Рассматривают три основных механизма, обеспечивающих замедление и предотвращение образования отложений [18]:

пороговое ингибирование – антискалант замедляет стадии нуклеации и роста кристаллов;

диспергирование – антискалант минимизирует (снижает) силы притяжения между частицами и предотвращает их слипание;

модификация кристаллов – антискалант изменяет кристаллическую структуру таким образом, что площадь поверхности частиц отложений уменьшается, ограничивая их способность прикрепляться к поверхностям и другим частицам.

На практике один и тот же антискалант может влиять на процесс осаждения при помощи сразу нескольких обозначенных механизмов. Эффективность работы различных ингибиторов солеотложений, как и скорость осаждения минеральных солей, зависит от температуры, pH, степени перенасыщения и присутствия других ионов в растворе. При этом для выбора вида и дозировки антискаланта с целью обеспечения его эффективной работы необходимо определение состава минеральных отложений и уровня концентрации веществ, вызывающих их образование [20].

Целью работы стало изучение минеральных отложений, образующихся в варочных установках непрерывного действия типа «Камюр» для производства сульфатной целлюлозы, анализ основных источников поступления минеральных веществ и их компонентного состава.

Объекты и методы исследования

Объектами данного исследования являлись образцы минеральных отложений варочных установок типа «Камюр», белый и черный щелока, производственная вода, технологическая щепка и сульфатная целлюлоза, отобранные на действующем ЦБП Российской Федерации.

Определение количественного содержания солей жесткости в пробах воды осуществляли комплексонометрическим методом, описанным в работе

[6]. Влагосодержание проб отложений, целлюлозы и щепы определяли согласно ГОСТ 16932–93.

Прокаливание образцов минеральных отложений для их озоления проводили в муфельной печи по ГОСТ Р 70267–2022. Для определения содержания золы в пробах целлюлозы и щепы использовали метод, приведенный в ГОСТ 18461–93.

Для подготовки проб щепы и целлюлозы к анализу методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES) исследуемую пробу озоляли в муфельной печи. Золу растворяли в нагретой концентрированной азотной кислоте. Кислотную смесь повторно нагревали и после охлаждения переносили в герметичную емкость. Пробы щелоков растворяли в азотной кислоте при нагревании с последующим отделением органической части. Анализ образцов осуществляли на приборе ICPE-9000.

ИК-спектры проб записывали с использованием ИК-Фурье спектрометра Vertex 70 (Bruker, Германия), оборудованного приставкой нарушенного полного внутреннего отражения GladiATR (Pike Technologies, США). Обработку спектров проводили с помощью программного обеспечения Opus (Bruker, Германия).

Для установления химического состава окалина применяли метод фундаментальных параметров с использованием прибора EDX-8000. Количественное содержание углерода и водорода определяли методом сжигания и газохроматографического анализа продуктов горения с использованием прибора EA3000.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании многолетнего опыта работы Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ им. М.В. Ломоносова с целлюлозно-бумажными предприятиями и литературных данных [4, 5, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 21, 22] возможно выделить два основных участка образования минеральных отложений в варочных установках непрерывного действия типа «Камюр»: перфорированное сито загрузочного устройства варочного котла и внутренние поверхности теплообменников для подогрева щелока варочных зон.

Для определения состава минеральных отложений был выполнен их анализ по общепринятым методикам. Образцы отложений (рис. 1) были отобраны на ЦБП во время вынужденных остановок.



a



б

Рис. 1. Внешний вид отложений в системе варочного котла: *a* – на перфорированном сите загрузочного устройства; *б* – в трубчатом теплообменнике

Fig. 1. Deposits in the digester system: *a* – on a perforated sieve of the feeding device; *б* – in the tubular heat exchanger

Типовые ИК-спектры для испытуемых образцов в сравнении с библиотечными ИК-спектрами представлены на рис. 2.

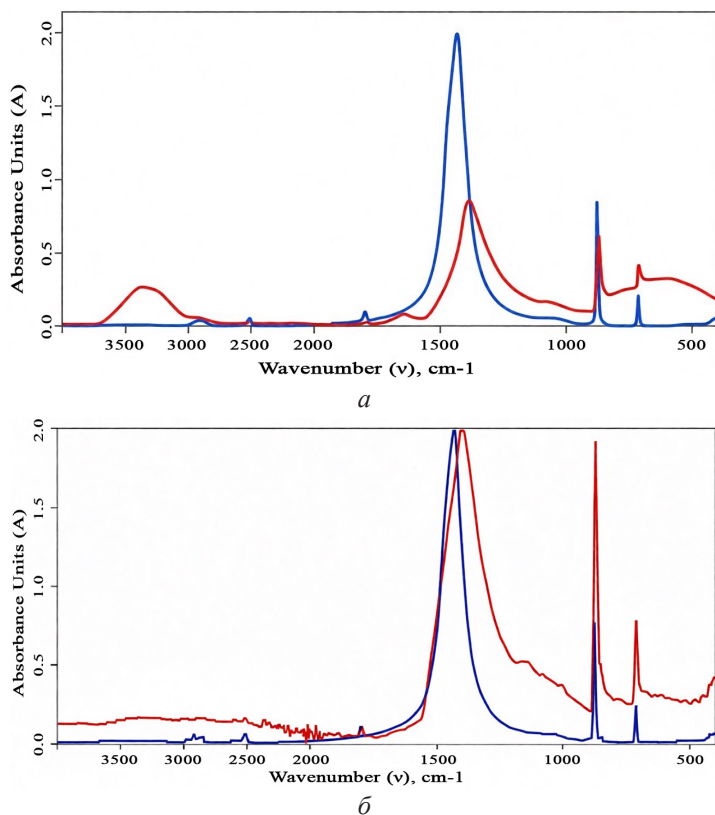


Рис. 2. ИК-спектры образцов отложений (красный) и карбоната кальция (синий):

a – на перфорированном сите загрузочного устройства;

б – в трубчатом теплообменнике. Absorbance Units (A) – оптическая плотность;

Wavenumber (ν) – волновое число

Fig. 2. IR spectra of deposit samples (red) and calcium carbonate (blue): *a* – on a perforated sieve of the feeding device; *б* – in the tubular heat exchanger

Для ИК-спектров исследуемых образцов характерно максимальное совпадение положения полос поглощения с библиотечным ИК-спектром карбоната кальция.

Результаты элементного анализа двух образцов отложений, отобранных во время двух плановых работ в варочном цехе, и потери при их прокаливании при различных температурах представлены в табл. 1.

Высокий уровень зольности от 95,7 до 98,1 % при температуре 575 °С свидетельствует о преимущественно минеральной природе отложений. Повышение в пробах потерь после прокаливания при 900 °С над потерями после прокаливания при 575 °С указывает на присутствие в исследованных отложениях карбонатов, что подтверждается активной реакцией выделения углекислого газа при взаимодействии проб с соляной кислотой. При этом по данным элементного анализа минеральная часть отложений содержит в основном кальций, доля которого достигает в разных пробах 35,3...37,1 %. Сопоставление долевого содержания кислорода, углерода и кальция в проанализированных пробах соотносится с химической формулой карбоната кальция, который является основным компонентом обсуждаемых минеральных отложений.

Таблица 1

Результаты анализа проб отложений
Results of the deposit samples' analysis

Показатель/Элемент	В трубчатом теплообменнике		На перфорированном сите загрузочного устройства	
	1-й отбор	2-й отбор	1-й отбор	2-й отбор
Потери при прокаливании, %, при 575 °С	1,9	2,0	4,3	3,6
Потери при прокаливании, %, при 900 °С	43,3	43,1	45,0	44,5
Содержание элемента, %				
O	42,80	43,92	45,08	46,90
Ca	36,40	37,08	35,31	36,50
C	15,46	14,30	16,10	13,10
Na	3,84	3,19	1,68	1,19
S	0,50	0,49	0,19	0,08
Fe	0,04	0,11	0,03	0,11
Ni	0,03	0,02	H/o	0,02
Zn	0,10	0,10	0,02	0,01
Mg	0,12	0,20	0,22	0,43
Al	0,08	0,08	0,09	0,09
Si	0,10	0,07	0,23	0,57
K	0,10	0,03	0,05	0,01
Ti	0,07	0,05	H/o	0,11
Cr	0,01	0,01	H/o	0,01
Mn	0,06	0,04	0,02	0,36
Cu	0,01	0,02	0,01	0,02
Sr	0,11	0,10	0,11	0,10
Rb	H/o	H/o	H/o	H/o
Ba	0,19	0,21	0,17	0,31
Br	H/o	H/o	H/o	H/o
N	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
H	<0,10	<0,10	0,66	<0,10

H/o – ниже определяемого диапазона.

Образование накипи на данных участках варочных установок обусловлено следующими процессами:

изменением концентрации ионов кальция и карбонат-ионов в линии загрузки варочного котла за счет смешения циркуляционного щелока, белого щелока, слабого черного щелока и водорастворимых веществ, образующихся при пропарке щепы;

переходом минеральной части древесины в варочный раствор в процессе варки;

усилением скорости агломерации частиц и их осаждения при повышении температуры варочного щелока в теплообменниках варочных зон.

Основным источником поступления карбонат-ионов в варочный котел является белый щелок. Содержание карбоната натрия в нем напрямую зависит от степени каустизации и отражает качество работы цеха каустизации и регенерации извести. На рис. 3 приведены зависимости содержания кар-

боната натрия от степени каустизации белого щелока, отобранного на двух производствах сульфатной небеленой целлюлозы отечественного предприятия ЦБП – лиственной и хвойной. Выборка сформирована в течение 1 года и содержит результаты анализов 22 независимых отборов производственного белого щелока.

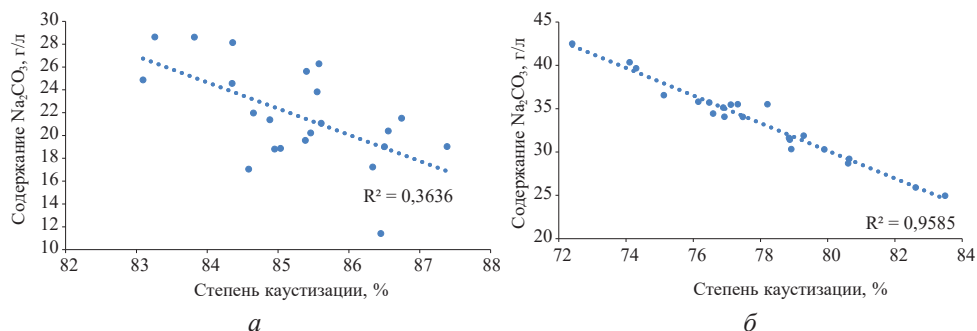


Рис. 3. Зависимость концентрации карбоната натрия в белом щелоке от степени его каустизации для производства сульфатной целлюлозы: а – лиственной; б – хвойной

Fig. 3. Dependence of the sodium carbonate concentration in white liquor on its degree of causticization for the production of hardwood (а) and softwood (б) sulfate pulp

Результаты экспериментов хорошо согласуются с данными работы [5], в которой показано, что более высокая степень каустизации щелока способствует снижению образования накипи за счет уменьшения содержания карбоната натрия в белом щелоке и, как следствие, понижению его количества, подаваемого на варку.

Содержание карбоната натрия в проанализированных пробах белого щелока изменяется в диапазоне от 11,4 до 39,7 г/л. При этом с учетом реального расхода белого щелока, используемого для варки целлюлозы на обсуждаемых производствах, часовое поступления карбоната натрия составляет от 1938 до 4862 кг/ч для лиственного потока и от 2450 до 3891 кг/ч для хвойного потока. Таким образом, значительное изменение данного показателя делает его стабилизацию крайне важной технологической задачей с целью минимизации образования минеральных отложений в варочных установках типа «Камюр».

Для определения уровней прихода и расхода кальция в варочный котел был выполнен анализ основных источников поступления минеральных веществ: технологической щепы лиственных и хвойных пород древесины, целлюлозы после промывки, белого щелока, черного щелока и слабого черного щелока, отобранных на двух различных производствах. Усредненные результаты по году представлены в табл. 2 с учетом реальной производительности варочных установок.

Согласно полученным результатам для выбранных варочных установок до 96 % кальция поступает в варочный котел с технологической щепой. После варки и промывки в зависимости от степени провара полуфабриката с целлюлозной массой уходит от 66 до 81 % данного компонента по отношению к его исходному количеству. Оставшаяся часть кальция отделяется при промывке и переходит в слабый черный щелок, повторно направляемый для поддержания гидромодуля варочного котла, а также для подачи в зону диффузионной промывки/вытеснения и на выпарку.

Таблица 2

Содержание кальция в основных источниках поступления минеральных веществ в варочную установку типа «Камюр»
Calcium content in the main sources of mineral substances' input to a Kamur digester

Наименование	Содержание				Баланс кальция, кг/ч	
	золы, %		ионов кальция, мг/л (жидкость), мг/кг (твердое вещество)			
	ЛВ	ХВ	ЛВ	ХВ	ЛВ	ХВ
Приход						
Технологическая щепа	0,5	0,3	1140	863	120	48
Белый щелок	—	—	19	19	3	2
Слабый черный щелок на поддержание гидромодуля	—	—	21	—	1	—
Общее количество:					124	50
Расход						
Целлюлоза после промывки	2	1	1760	1015	100	33
Черный щелок на выпарку	—	—	22	24	7	2
Общее количество:					107	35

Примечание: ЛВ – лиственное волокно; ХВ – хвойное волокно.

Для промывки целлюлозы после варки преимущественно используются оборотные щелочные фильтраты и заданное количество свежей технологической воды, качество и глубина подготовки которой зависят от вида производимой целлюлозы. Химический состав потребляемой предприятием воды существенно различается в зависимости от характеристик водного источника и времени года. Наибольший интерес для контроля кальциевых отложений варочного котла представляют растворенные в воде соли временной жесткости, обусловленные содержанием карбонатов магния и кальция.

Традиционно на предприятиях ЦБП для промывки целлюлозы используется противоточная схема промывки, когда на последние ступени подается свежая вода, а фильтраты с последующей ступени направляются на предыдущую. В связи со сложностью закрутки фильтратов и непостоянством их химического состава ввиду накопления в расходных баках для производства лиственной целлюлозы была выполнена оценка влияния жесткости воды на содержание кальция в черном щелоке, косвенно характеризующая изменение количества поступающего кальция со слабым черным щелоком, подающимся для поддержания гидромодуля при варке.

На рис. 4 представлен график изменения концентрации ионов кальция в технологической воде и черном щелоке в зависимости от времени года.

Рис. 4. Изменение концентрации кальция в производственной воде и черном щелоке в зависимости от времени года
Fig. 4. Changes in calcium concentration in process water and black liquor depending on the season



Представленные данные демонстрируют сопоставимые зависимости изменения во времени жесткости воды и концентрации кальция в черном щелоке. Таким образом, количество кальция, вносимого в систему со свежей водой, непосредственно влияет на уровень поступления и содержания кальция в слабом черном щелоке, подающемся для поддержания гидромодуля при варке.

Заключение

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что основным компонентом исследованных образцов минеральных отложений в варочных установках непрерывного действия типа «Камюр» производства сульфатной целлюлозы является карбонат кальция, доля которого достигает до 94 %. При этом органическая часть состава отложений составляет не более 4 %.

Основным процессом, приводящим к образованию карбонатных кальциевых отложений, является взаимодействие ионов кальция и карбонат-ионов непосредственно при делигнификации древесины, обусловленное изменением их концентраций и условиями технологического процесса. В связи с этим определены основные источники и уровни поступления ионов кальция и карбонат-ионов в установки непрерывного действия типа «Камюр», применяемые для варки различных видов целлюлозы.

Установлено, что уровень часового поступления карбоната натрия в варочный котел с белым щелоком для выбранных производственных условий варьируется в широком диапазоне значений от 1900 до 4900 кг/ч и прямо пропорционально снижается в зависимости от степени каустизации белого щелока, которая, в свою очередь, обусловлена применяемой на предприятии технологией его получения.

Основным источником поступления ионов кальция являются технологическая щепка, однако свой вклад вносят также крепкий белый щелок и слабый черный щелок, подающийся для поддержания гидромодуля. На основе экспериментальных данных представлен укрупненный баланс по кальцию применительно к анализу работы выбранных варочных установок непрерывного действия типа «Камюр».

В связи с тем, что регулирование минеральной части древесины не представляется возможным, основным инструментом минимизации образования минеральных отложений в варочных установках типа «Камюр» следует рассматривать контроль и регулирование качества белого щелока в процессе регенерации химикатов, а также технической воды в процессах водоподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бриков А.В. Нефтепромысловая химия: Практическое руководство по борьбе с образованием солей. М.: Де`Либри, 2018. 335 с.

Brikov A.V. *Oilfield Chemistry: A Practical Guide to Combating Salt Formation*. Moscow, De`Libri Publ., 2018. 335 p. (In Russ.).

2. Демаков Ю.П., Швецов С.М., Швецов А.М. Зольный состав древесины различных пород деревьев в пойменном биотопе // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2012. № 31. С. 125–129.

Demakov Yu.P., Shvetsov S.M., Shvetsov A.M. Ash Composition of Timber Different Species of Trees in the Floodplain Biotope. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2012, no. 31, pp. 125–129. (In Russ.).

3. Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Севастьянова Ю.В. Сульфатная варка целлюлозы. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 175 с.

Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Sevastyanova Yu.V. *Sulfate Pulping*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2019. 175 p. (In Russ.).

4. Непенин Н.Н. Технология целлюлозы. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956–1963. 2 т. 936 с. Nepenin N.N. *Pulp Technology*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1956–1963, vol. 2. 936 p. (In Russ.).

5. Постникова М.В., Фоминых О.В., Ермашева В.М. Изучение причин образования накипи на оборудовании варочных установок «Камюр» // Вестн. ПНИПУ. Химич. технология и биотехнология. 2009. № 9. С. 272–278.

Postnikova M.V., Fominykh O.V., Ermasheva V.M. A Study of the Causes of Deposit Formation on Equipment of Kamur Digesters. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2009, no. 9, pp. 272–278. (In Russ.).

6. Правилова Т.А. Химический контроль производства сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 256 с.

Pravilova T.A. *Chemical Control of Sulfate Pulp Production*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1984. 256 p. (In Russ.).

7. Севастьянова Ю.В., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Дубовый В.К. Регенерация химикатов в производстве сульфатной целлюлозы (каустизация и регенерация извести). Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 143 с.

Sevastyanova Yu.V., Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Dubovy V.K. *Regeneration of Chemicals in Sulfate Pulp Production (Causticization and Regeneration of Lime)*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2019. 143 p. (In Russ.).

8. Duggirala P.Y. Formation of Calcium Carbonate Scale and Control Strategies in Continuous Digesters. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*. 2005. 34 p. Available at: https://www.eucalyptus.com.br/icep02/prassad_duggirala.pdf (accessed 04.01.26).

9. Gemzická E., Šima J., Vrška M., Holeš M. Effect of pH and Washing on Calcium and Magnesium Distribution Between Pulp and Filtrate. *Chemical Papers*, 2010, vol. 64, iss. 1, pp. 741–748. <https://doi.org/10.2478/s11696-010-0061-3>

10. Guo J., Severtson S.J. Inhibition of Calcium Carbonate Nucleation with Aminophosphonates at High Temperature, pH and Ionic Strength. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, vol. 43(17), pp. 5411–5417. <https://doi.org/10.1021/ie049787i>

11. Holmbom B. Analysis of Papermaking Process Waters and Effluents. *Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking*. Berlin, Springer, 2017, pp. 269–285. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03898-7_9

12. Huber P., Burnet A., Petit-Conil M. Scale Deposits in Kraft Pulp Bleach Plants with Reduced Water Consumption: A Review. *Journal of Environmental Management*, 2014, no. 141, pp. 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.053>

13. Kemmer I. The NALCO Water Handbook. New York, McGraw-Hill, Inc., 1979. 1071 p.

14. Kent K., Mathur F., Bharati R. Proven Solutions to Minimise Inorganic Process Scaling in Pulp and Recovery. *Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment*, 2013, vol. 66, pp. 197–203.

15. Ketrane R., Saidani B., Gil O., Leleyter L., Baraud F. Efficiency of Five Scale Inhibitors on Calcium Carbonate Precipitation from Hard Water: Effect of Temperature and Concentration. *Desalination*, 2009, vol. 249, iss. 3, pp. 1397–1404.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.013>

16. MacAdam J., Parsons S.A. Calcium Carbonate Scale Formation and Control. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2004, vol. 3, pp. 159–169. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-3849-1>

17. Severtson S., Duggirala P., Carter P., Reed P. Mechanism and Chemical Control of CaCO₃ Scaling in the Kraft Process. *TAPPI Journal*, 1999, vol. 82, no. 6, pp. 167–174.

18. Sitholé B. Scale Deposit Problems in Pulp and Paper Mills. *African Pulp and Paper Week, Durban, South Africa, October 8–11, 2002*. Durban, South Africa, 2002. Available at: http://www.tappsa.co.za/archive/APPW2002/Title/Scale_deposit_problems/scale_deposit_problems.html (accessed 22.06.26).

19. Sithole B., Doucette M., Fiolet R. Controlling Barium Sulphate Scale Deposition Problems in an Unbleached Kraft Paper Mill. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2015, vol. 74(4), pp. 236–244.

20. Väisänen H. *CaCO₃ Scale Inhibition in Paper Making Processes – Evaluation of Testing Methods and Inhibitor Performance*. M.Sc. Thesis. Tampere, Finland, Tampere University of Technology, 2011. 95 p.

21. Wikander K., Kjellin P., Holmberg K. The Effect of Lignin on Calcium Carbonate Scaling. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 286–289. <https://doi.org/10.3183/npprj-2006-21-03-p286-289>

22. Zakir T., Tran H., Papangelakis V.G. Characterization of Hard Scale Formed in the Kraft Mill Green Liquor Processing Equipment. *TAPPI Journal*, 2013, vol. 12, no. 1, pp. 55–61. <https://doi.org/10.32964/TJ12.1.53>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Краткое сообщение

УДК 630*232

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-193-200

Возрастные изменения участия деревьев разных классов Крафта в структуре культур *Picea abies* (L.)**М.Д. Мерзленко¹**, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178),ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>**В.А. Брынцев²**, д-р с.-х. наук, доц., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444),ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>**А.А. Коженкова²**, канд. с.-х. наук, доц., науч. сотр.; ResearcherID: [AAN-2228-2021](https://orcid.org/0000-0003-1518-7165),ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>¹Институт лесоведения РАН, с. Успенское, Московская обл., Россия; md.merzlenko@mail.ru²Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Россия; bryntsev@mail.ru, kozhenkova_anna@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.25 / Одобрена после рецензирования 27.05.25 / Принята к печати 29.05.25

Аннотация. Изучались возрастные изменения участия деревьев разных классов Крафта в структуре лесных культур ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), произрастающих в центре Русской равнины в лесорастительных условиях ельника-кисличника (*Piceetum oxalidosum*). Расчленение искусственного насаждения на классы Крафта отражает функциональную иерархию одновидового дендроценоза и его специфику во времени. Актуальность работы обусловлена отсутствием подобных исследований для искусственных дендроценозов. Динамика ранговой структуры классов Крафта рассмотрена в чистых по составу лесных культурах ели европейской на протяжении 15–90-летнего возрастного периода. Установлено, что до 40 лет распределение деревьев по классам Крафта соответствует кривой нормального распределения. Затем динамика долевого участия классов носит волнообразный характер, сдвигаясь в сторону высших рангов (I и II классов). Это связано с отпадом в возрастах 30–35, 50 и 80 лет. В возрасте 40, 60 и 90 лет резко уменьшается доля деревьев IV–V классов и максимально возрастает доля деревьев I и II классов. Установлено, что редуccionные числа как по высоте, так и по среднепериодическому текущему приросту объема ствола строго дифференцированы по классам Крафта. Большие редуccionные числа, свойственные деревьям I и II классов по сравнению с деревьями других классов на протяжении 90 лет развития культур, являются результатом интенсивных ростовых процессов. Это делает деревья I и II классов Крафта перспективными в течение всего хода искусственного лесовыращивания. Они особенно ценны в плантационном лесоводстве.

Ключевые слова: лесные культуры, ель европейская, классы Крафта, редуccionное число, среднепериодический текущий прирост

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИЛАН РАН по теме № 126021217092-3 (М.Д. Мерзленко) и в рамках госзадания ГБС РАН по теме № 126020916823-0 (В.А. Брынцев и А.А. Коженкова).

© Мерзленко М.Д., Брынцев В.А., Коженкова А.А., 2026

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

Для цитирования: Мерзленко М.Д., Брынцев В.А., Коженкова А.А. Возрастные изменения участия деревьев разных классов Крафта в структуре культур *Picea abies* (L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 193–200.
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-193-200>

Brief report

Age-Related Changes in the Participation of Trees of Different Kraft Classes in the Structure of *Picea abies* (L.) Plantations

Mikhail D. Merzlenko¹, Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Vladimir A. Bryntsev², Doctor of Agriculture, Assoc. Prof., Chief Research Scientist;

ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

Anna A. Kozhenkova², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Research Scientist;

ResearcherID: [AAN-2228-2021](https://orcid.org/0000-0003-1518-7165), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, s. Uspenskoye, Moscow Region, Russia; md.merzlenko@mail.ru

²Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; bryntsev@mail.ru, kozhenkova_anna@mail.ru

Received on April 7, 2025 / Approved after reviewing on May 27, 2025 / Accepted on May 29, 2025

Abstract. The research covered age-related changes in the proportion of trees belonging to different Kraft classes in the structure of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forest plantations growing in the central Russian Plain under the site conditions of the wood sorrel spruce forest (*Piceetum oxalidosum*). The classification of an artificial stand into Kraft classes reflects the functional hierarchy of a single-species tree community and its temporal dynamics. The study relevance stems from the lack of similar research on artificial tree communities. The Kraft classes' rank structure dynamics were observed in pure stands of European spruce over a 15–90-year age range. It has been found that the distribution of trees (up to 40 years old) by Kraft classes follows a normal distribution curve. Subsequently, the trend in the proportion of each class follows a wave-like pattern, shifting toward the higher ranks (Classes I and II). This is due to a decline at the ages of 30–35, 50, and 80. At the ages of 40, 60, and 90, the proportion of the IV–V class trees decreases sharply, while the proportion of the I and II class trees reaches its peak. It has also been found that the reduction rates for both height and the average periodic current increment in trunk volume are strictly differentiated according to Kraft classes. The intensive growth processes result in the high reduction rates observed in the I and II class trees compared to trees of other classes over the entire 90-year development of stands. This makes the I and II Kraft class trees promising throughout the entire course of artificial forest growing. They are particularly valuable in plantation forestry.

Keywords: forest plantations, Norway spruce, Kraft classes, reduction number, average periodic current increment

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, topic No. 126021217092-3 (M.D. Merzlenko) and within the framework of the state assignment of the Tsitsin Main Botanical Garden of Academy of Sciences, topic No. 126020916823-0 (V.A. Bryntsev and A.A. Kozhenkova).

For citation: Merzlenko M.D., Bryntsev V.A., Kozhenkova A.A. Age-Related Changes in the Participation of Trees of Different Kraft Classes in the Structure of *Picea abies* (L.) Plantations. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 193–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-193-200>

Введение

Виды рода *Picea* широко распространены по всей территории северного полушария Евразии [10, 19]. Филогения и биогеография рода *Picea* – следствие долгой и сложной истории расселения этих растений [14–16], в которой наряду с дивергенцией и экспансией большую роль играла гибридизация между видами – сетчатая эволюция [17]. Ель – это типичный доминантный представитель бореальных лесов. На территории европейской части Российской Федерации ель является лесообразователем темнохвойных лесов [10, 21]. В центре Русской равнины ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.) начиная с 60-х гг. XX в. стала преобладающей породой при создании искусственных насаждений [9], в т. ч. плантационных лесных культур [6, 7].

Насчитываются сотни тысяч гектаров чистых по составу рукотворных ельников, однако специфика ранговой структуры лесных культур, которую четко отражает классификация Крафта, до сих пор не изучена [13]. Она базируется на свойственной природе леса дифференциации деревьев по степени господства и угнетения.

Согласно классификации Крафта основную массу древесины дают прегосподствующие и господствующие деревья (I и II классы Крафта) [3, 4, 6, 18, 20]. Деревья I, II и III классов характеризуются максимальным урожаем семян [8], а согосподствующие деревья (III класс) являются самыми продуктивными в отношении работы хвои [1], наиболее интенсивно расходуя ассимилянты на достижение наибольшего текущего прироста древесной массы ствола в абсолютно сухом состоянии.

Классификация Крафта находит применение и в практике лесного хозяйства [12]. Например, она используется в ходе выполнения различных рубок ухода, в частности по низовому методу, когда удаляются деревья V и частично IV классов.

Цель исследования – на примере лесных культур ели европейской проанализировать возрастные изменения долевого участия деревьев разных классов Крафта, а также проследить динамику изменения редуционных чисел по высоте деревьев и по среднепериодическому текущему приросту объемов стволов деревьев разных классов Крафта.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено в 11 лесничествах центра Русской равнины на территории Смоленско-Московской возвышенности. Объектами исследования послужили чистые по составу лесные культуры ели европейской, произрастающие в лесорастительных условиях ельников-кисличников (*Piceetum oxalidosum*); тип условий местопроизрастания – С₃. Лесные культуры были созданы рядовой посадкой 2-летних сеянцев с густотой посадки 4–6 тыс. шт./га.

Пробные площади закладывались в культурах 10–90-летнего возраста общепринятыми в лесоводстве и лесной таксации методами. Всего заложено

145 пробных площадей. На 9 из них взяты модельные деревья по способу пропорционально-ступенчатого представительства [11]. Условием подбора участка под пробную площадь было отсутствие в искусственном насаждении интенсивного промежуточного пользования, а также проведение санитарных рубок.

В ходе перечетов деревья разделялись по классам роста и развития Крафта, учитывались сухостойные стволы. По каждому модельному дереву выполнялся полный анализ древесного ствола. Запас стволовой древесины ($\text{м}^3/\text{га}$) рассчитывался по формуле:

$$M = HFG,$$

где H – средняя высота искусственного насаждения, м; F – видовое число; G – сумма площадей сечений, $\text{м}^2/\text{га}$.

Так как высота является главным критерием при определении класса Крафта, то для каждого класса рассчитывалось редукционное число (%) по формуле:

$$R_h = h/H \cdot 100,$$

где h – средняя высота конкретного класса, м.

Аналогично этой формуле находились редукционные числа по каждому классу Крафта в отношении среднепериодического текущего прироста по объему ствола.

Результаты исследования и их обсуждение

С возрастом насаждения после смыкания деревьев поток и интенсивность ранговых перемещений постепенно убывают, прирост деревьев становится более пропорциональным их размерам, а их ранговый статус в большей мере стремится к постоянству [4, 5]. После фазы жердняка мобильность перехода деревьев из класса в класс Крафта почти затихает, а различия в долевом участии классов в насаждении связываются исключительно с отпадом деревьев.

Следует учесть, что классификация Крафта относится только к живым деревьям, на что указывал Г.Ф. Морозов [6]. Наибольший отпад в чистых по составу хвойных культурах происходит в фазе жердняка.

По нашим данным (табл. 1), качественная сторона отпада выражается по-разному на различных возрастных этапах древостоя.

Таблица 1

Соотношение средних диаметров растущих деревьев с диаметром стволов отпада, см
Ratio of the growing trees' average diameters to the fallen trunks' diameters, cm

Категория деревьев	Диаметр при возрасте культур, лет				
	20	40	60	80	100
Отпад	3,8	8,4	13,0	14,9	26,0
Растущие	8,9	16,3	21,6	24,3	30,5
Разница, %	57	49	40	39	15

Так, в рядовых культурах ели европейской с густотой посадки 5 тыс. шт./га в 17–20 лет отмирают экземпляры из V, IV и даже III классов Крафта, в 25–45-летнем возрасте в отпад начинает поступать часть стволов II класса, а с 55 лет добавляются деревья I класса Крафта. В количественном отношении в отпаде культур ели в 20–55 лет преобладают деревья V класса Крафта (до 90 %), а по мере увели-

чения возраста представленность в отпаде деревьев различных классов Крафта становится более широкой. Происходит перераспределение долей отпада в разрезе всех 5 классов, в силу чего со временем средние диаметры элиминирующих стволов выравниваются со средним диаметром растущих деревьев.

В табл. 2 дана динамика ранговой структуры в чистых по составу культурах ели. Она приводится нами в долевым участии классов Крафта на протяжении 15–90-летнего периода. Фактически до 40 лет распределение деревьев по классам Крафта почти соответствует кривой нормального распределения, потом симметрия резко нарушается и для возрастов 40, 60 и 90 лет свойственна положительная асимметрия, когда доля деревьев высших (I и II) классов Крафта превышает 50 %.

Таблица 2

Возрастная динамика ранговой структуры и участия отмершей древесины, %
Age-related trends in the rank structure and the dead wood proportion, %

Возраст культур, лет	Распределение деревьев по классам Крафта					Доля сухостоя от общего запаса
	I	II	III	IV	V	
15	17	21	23	22	17	0,4
20	20	22	22	21	15	0,9
25	17	20	26	21	16	3,4
30	14	21	25	22	18	5,5
35	21	19	26	20	14	6,6
40	30	21	24	16	9	3,2
45	21	20	25	20	14	4,9
50	11	21	26	25	17	5,2
60	35	24	20	13	8	4,7
70	27	23	22	15	13	3,7
80	22	23	24	18	13	4,2
90	38	30	15	10	7	2,6

Это характерно для волнообразного отпада, причем его максимум приходится на возрасты 30–35, 50 и 80 лет. В эти возраста максимальное содержание сухостоя составляет соответственно 5,5–6,6; 5,2 и 4,2 % от общего запаса культур ели. Наблюдаются отпад и накопление сухостоя, после чего резко уменьшается доля деревьев низших (V и IV) классов Крафта, а доля деревьев I и II классов, напротив, скачкообразно возрастает. Это происходит в возрасте насаждения 40, 60 и 90 лет. Волнообразность процесса отпада, приводящая к перегруппировке долевого участия разных классов Крафта, – пример биоценотической цикличности в рукотворном дендроценозе лесных культур ели европейской [2].

Высота является главным диагностическим признаком при определении класса Крафта. Поэтому нами рассмотрена возрастная динамика редуционных чисел по высоте (табл. 3).

Данные табл. 3 показали, что во всех возрастах от 10 до 90 лет редуционные числа по высоте строго дифференцированы по классам Крафта. Наиболее стабильны значения у III класса Крафта, составляя за указанный диапазон времени в среднем 100 %. Начиная с 10 по 40 лет редуционные числа у деревьев I

и II классов уменьшались, у деревьев IV и V классов в 10–70 лет увеличивались при приближении высоты к средней для всего насаждения. В период с 70 по 90 лет редуccionные числа по высотам стабилизировались у всех классов кроме V, что свидетельствует о превалировании в этот промежуток времени отпада из деревьев V класса.

Таблица 3

Возрастная динамика редуccionных чисел, %, по высоте
Age-related trends in the reduction rates, %, by height

Возраст культур, лет	Редуccionные числа по классам Крафта				
	I	II	III	IV	V
10	156	125	109	78	56
20	143	112	100	81	64
30	121	109	99	89	70
40	115	103	97	84	73
50	116	107	99	84	74
60	116	105	100	90	78
70	114	105	99	88	80
80	114	106	99	88	79
90	113	106	99	88	78

Редуccionные числа по среднепериодическому текущему приросту (табл. 4) также дифференцированы по разным классам Крафта. Возрастная динамика этих редуccionных чисел имеет специфику. Так, для деревьев высших рангов до 80–90 лет свойственно повышение редуccionных чисел, а у деревьев IV класса с возрастом происходит их снижение начиная с 40–50 лет, для деревьев V класса – с 30–40 лет. Высокие редуccionные числа среднепериодического текущего прироста по объему ствола, характерные для деревьев I и II классов Крафта, являются отражением интенсивности ростовых процессов, среди которых в первую очередь надо назвать камбиальную деятельность. Такие деревья наиболее перспективны в плантационном лесовыращивании.

Таблица 4

Возрастная динамика редуccionных чисел, %, по среднепериодическому текущему приросту объема ствола
Age-related trends in the reduction rates, %, by the average periodic current increment of trunk volume

Возрастной период, лет	Редуccionные числа по классам Крафта				
	I	II	III	IV	V
10–20	157	135	104	48	30
20–30	155	126	101	61	53
30–40	170	116	107	61	42
40–50	177	134	98	54	42
50–60	177	135	96	52	43
60–70	189	146	85	47	38
70–80	214	148	85	37	19
80–90	210	134	81	20	15

Выводы

1. Динамика ранговой структуры в долевым участии разных классов Крафта резко нарушается в возрасте 40, 60 и 90 лет, когда доля деревьев высших (I и II) классов резко переходит за 50 %. Происходит это по причине предшествующего «сброса» накопившегося отпада деревьев в 30–35, 50 и 80 лет и последующей активизации ростовых процессов.

2. Распределение редуccionных чисел как по высоте, так и по среднепериодическому текущему приросту строго дифференцировано по классам Крафта. Высокие редуccionные числа деревьев I и II классов являются на протяжении 90-летнего роста лесных культур свидетельством интенсивных процессов развития по сравнению с другими классами, что делает их перспективными для искусственного лесовыращивания.

3. Распределение деревьев искусственного насаждения по классам Крафта отражает функциональную иерархию одновидового дендроценоза и его специфику во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса сосны и ели в Европейской части России. Архангельск: АГТУ, 2004. 112 с.

Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce in the European Part of Russia*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2004. 112 p. (In Russ.).

2. Брынцев В.А. Эволюция в движении: Циклические процессы природы и общества. М.: ЛЕНАНД, 2017. 152 с.

Bryntsev V.A. *Evolution in Motion: Cycle Processes of Nature and Society*. Moscow, LENAND Publ., 2017. 152 p. (In Russ.).

3. Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 208 с.

Kuzmichev V.V. *Patterns of Tree Stand Dynamics: Principles and Models*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 208 p. (In Russ.).

4. Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с.

Maslakov E.L. *Formation of Young Pine Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 168 p. (In Russ.).

5. Мерзленко М.Д. Очерки о лесокультурной науке. 2-е изд. испр. и доп. М.: Изд. дом Рученькиных, 2025. 160 с.

Merzlenko M.D. *Essays on Forestry Science*. Moscow, The Ruchen'kins Publishing House, 2025. 160 p. (In Russ.).

6. Морозов Г.Ф. Основания учения о лесе: лекции, читанные в Таврическом Университете. Репринтное издание. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. 330 с.

Morozov G.F. *Principles of Forest Science: Lectures Delivered at the Taurida University*. Moscow, MGUL Publ., 2011. 330 p. (In Russ.).

7. Плантационное лесоводство / под общ. ред. И.В. Шутова. СПб.: Политехн. ун-т, 2007. 364 с.

Plantation Forestry. General Editorship of I.V. Shutov. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2007. 364 p. (In Russ.).

8. Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Лесные культуры. В 2 ч. Ч. 1. М.: Юрайт, 2017. 225 с.

Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A. *Forest Plantations*. In 2 parts. Part 1. Moscow, Yurait Publ., 2017. 225 p. (In Russ.).

9. Rogozin M.V., Razin G.S. Лесные культуры Теплоуховых в имении Строгановых на Урале: история, законы развития, селекция ели. Пермь: Пермск. гос. нац.-исследоват. ун-т, 2012. 210 с.

Rogozin M.V., Razin G.S. *Forest Plantations of the Teploukhovs in the Stroganov Estate in the Urals: History, Laws of Development, Spruce Breeding*. Perm, PSU Publ., 2012. 210 p. (In Russ.).

10. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 335 с.

Rysin L.P., Savelyeva L.I. *Spruce Forests of Russia*. Moscow, Nauka Publ., 2002. 335 p. (In Russ.).

11. Третьяков С.В., Коптев С.В., Бахтин А.А., Ильинцев А.С. Лесная таксация. Часть 2. Таксация насаждений. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2020. 126 с.

Tretyakov S.V., Koptev S.V., Bakhtin A.A., Ilyintsev A.S. *Forest Inventory*. Part 2. Stand Inventory. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2020. 126 p. (In Russ.).

12. Burschel P., Huss J. *Grundriß des Waldbaus*. Berlin, Parey Buchverlag, 1997. 487 S. (In German).

13. Kraft G. *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover, Klindworth's Verlag, 1884. 144 S. (In German).

14. Latałowa M., van der Knaap W.O. Late Quaternary Expansion of Norway Spruce *Picea abies* (L.) Karst. in Europe According to Pollen Data. *Quaternary Science Reviews*, 2006, vol. 25, iss. 21-22, pp. 2780–2805. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.06.007>

15. Lockwood J.D., Aleksić J.M., Zou J., Wang J., Liu J., Renner S.S. A New Phylogeny for the Genus *Picea* from Plastid, Mitochondrial, and Nuclear Sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2013, vol. 69, iss. 3, pp. 717–727. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.07.004>

16. Ran J.-H., Wei X.-X., Wang X.-Q., Molecular Phylogeny and Biogeography of *Picea* (Pinaceae): Implications for Phylogeographical Studies Using Cytoplasmic Haplotypes. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2006, vol. 41, pp. 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2006.05.039>

17. Ran J.-H., Shen T.-T., Liu W.-J., Wang P.-P., Wang X.-Q. Mitochondrial Introgression and Complex Biogeographic History of the Genus *Picea*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2015, vol. 93, pp. 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2015.07.020>

18. Rubtzow M.V. Contribution of K.F. Turmer into Forestry. *Selected Works of K.F. Turmer*. Moscow, MGUL Publ., 2001, pp. 7–27.

19. Schmidt-Vogt H. *Die Fichte*. Ein Handbuch in zwei Bänden. Hamburg-Berlin, Verlag Paul Parey, 1977, Bd. 2. 486 S. (In German).

20. von Gadow K. *Waldstruktur und Wachstum: Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003/2004*. Göttingen, Universitätsdrucke Göttingen, 2003. 241 p. (In German). <https://doi.org/10.17875/gup2003-244>

21. Vronskaya A.M., Melnik P.G., Merzlenko M.D. Forest Dynamics Monitoring of Nikolskaya Forest Estate During f 130-Year Period. *Materials of the 18th International Conference of Young Scientists: Forests of Eurasia – Serbian Forests*. Belgrade, 2019, pp. 94–98.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest

Краткое сообщение

УДК 630*306

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-201-212

Эффективность автоматизации систем управления харвестеров

А.В. Кузнецов¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-5802-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-8729>

О.Н. Галактионов¹✉, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-5888-2020](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

А.А. Селиверстов¹, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-2022>

А.А. Гайда², мастер лесозаготовок; ResearcherID: [NLO-5970-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2455-3906>

¹Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия;
kuzalex@psu.karelia.ru, ong66@mail.ru✉, saa.pk@onego.ru

²АО «Кондопожское лесопромышленное хозяйство», г. Кондопога, Россия;
Office@klpkh.com

Поступила в редакцию 16.06.25 / Одобрена после рецензирования 11.09.25 / Принята к печати 14.09.25

Аннотация. В связи с санкционными ограничениями предприятия лесопромышленной отрасли столкнулись с рядом проблем, одной из которых является необходимость обновления и ремонта парка лесозаготовительной техники. Ведущие зарубежные производители лесозаготовительной техники постоянно совершенствуют свою продукцию, внедряя инновационные технологии. Одним из таких решений является использование на лесных машинах системы частичной автоматизации управления гидроманипулятором IBC (Intelligent Boom Control). Исходя из этого, возникла необходимость оценки работы лесозаготовительных машин с учетом новых технических условий (внедрения инновационных систем управления гидроманипулятором), в т. ч. в сравнении с альтернативными лесозаготовительными машинами. Цель исследования – анализ эффективности колесных и гусеничных харвестеров с учетом влияния современных систем управления гидроманипулятором. Задачи: 1. Формирование базы данных и оценка фактических показателей работы харвестера на базе экскаватора Sany SY245F, харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера John Deere 1270G 8WD, оснащенного системой IBC. 2. Построение статистической модели посредством регрессионных зависимостей, описывающей эффективность харвестеров в исследуемых природно-производственных условиях. 3. Обоснование выводов и выработка рекомендаций по применению колесных и гусеничных харвестеров. Проведена сравнительная оценка фактических показателей работы трех исследуемых харвестеров. Анализ показал преимущество по дневной выработке харвестера John Deere 1270G 8WD с системой IBC в сравнении с модификацией John Deere 1270G 6WD (в 1,32 раза) и харвестером на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F (в 1,54 раза). Для прогнозирования изменения дневной выработки в исследуемых природно-производственных условиях разработана регрессионная модель. Результаты оценки коррелируют с другими исследованиями и служат подтверждением постоянного роста эффективности лесозаготовительных машин при внедрении инновационных технологий. Необходимо учитывать, что усложнение системы управления манипулятором вызывает повышение стоимости техники и ее эксплуатации.



Ключевые слова: харвестер, лесозаготовительная техника, лесозаготовительная машина, эффективность харвестера, дневная выработка, производительность харвестера, автоматизация управления, система автоматизации управления, система интеллектуального управления, гидроманипулятор

Благодарности: Авторы выражают благодарность представителям и руководству компании АО «Кондопожское лесопромышленное хозяйство» за поддержку и предоставленную информацию.

Для цитирования: Кузнецов А.В., Галактионов О.Н., Селиверстов А.А., Гайда А.А. Эффективность автоматизации систем управления харвестеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 201–212. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-201-212>

Brief report

The Effectiveness of Automation in Harvester Control Systems

*Aleksei V. Kuznetsov*¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-5802-2016](https://orcid.org/0000-0003-3266-8729), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3266-8729>

*Oleg N. Galaktionov*¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAE-5888-2020](https://orcid.org/0000-0003-0768-3628), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-3628>

*Aleksander A. Seliverstov*¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-2022>

*Aleksander A. Gaida*², Forest Engineer; ResearcherID: [NLO-5970-2025](https://orcid.org/0009-0009-2455-3906), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2455-3906>

¹Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia; kuzalex@psu.karelia.ru, ong66@mail.ru, saa.pk@onego.ru

²АО Kondopoga Timber Industry Enterprise, Kondopoga, Russia; Office@klpkh.com

Received on June 16, 2025 / Approved after reviewing on September 11, 2025 / Accepted on September 14, 2025

Abstract. Due to sanctions, forestry enterprises have faced a number of challenges. The need to upgrade and repair logging equipment is among them. Leading international logging equipment manufacturers are constantly improving their equipment by implementing innovative technologies. The use of the Intelligent Boom Control (IBC) system for partially automated hydraulic manipulator control on forestry machines is one of the solutions. Therefore, it became necessary to evaluate the performance of logging machines with regard to new technical specifications (implementation of innovative hydraulic manipulator control systems), particularly in comparison with alternative logging machines. The research aims to analyze the performance of wheeled and tracked harvesters, considering the impact of modern hydraulic manipulator control systems. Objectives: 1. Creating a database and evaluate the actual performance metrics of harvesters based on the Sany SY245F excavator, the John Deere 1270G 6WD harvester, and the John Deere 1270G 8WD harvester equipped with the IBC system. 2. Developing a statistical model using regression analysis to describe the performance of harvesters under the studied natural and operating conditions. 3. Justifying the conclusions and drawing up recommendations on the use of wheeled and tracked harvesters. We have carried out a comparative assessment of the actual performance metrics of the studied harvesters. The analysis showed that the John Deere 1270G 8WD harvester with the IBC system had a higher daily output compared to the John Deere 1270G 6WD

model (1.32 times higher) and the harvester based on the Sany SY245F crawler excavator (1.54 times higher). A regression model has been developed to predict changes in daily power generation under the studied natural and operating conditions. The assessment results are consistent with other studies and confirm the steady improvement in the efficiency of logging machines with the adoption of innovative technologies. However, it should be considered that the increased complexity of the manipulator control system leads to higher equipment costs and operating expenses.

Keywords: harvester, logging equipment, logging vehicle, harvester efficiency, daily output, harvester productivity, control automation, control automation system, intelligent control system, hydraulic manipulator

Acknowledgments: We sincerely appreciate the support and information provided by the representatives and management of AO Kondopoga Timber Industry Enterprise.

For citation: Kuznetsov A.V., Galaktionov O.N., Seliverstov A.A., Gaida A.A. The Effectiveness of Automation in Harvester Control Systems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 201–212. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-201-212>

Введение

Лесопромышленный комплекс имеет важное значение для развития экономики России. В связи с санкционными ограничениями предприятия отрасли столкнулись со многими проблемами, одной из которых является обновление и ремонт парка лесозаготовительной техники.

В настоящее время на рынке широко представлена продукция белорусской компании «Амкор» [12, 16], а также китайские харвестеры на базе гусеничных экскаваторов, появляется информация об испытаниях и опытном производстве колесных лесозаготовительных машин китайского производства [11], существует обширный рынок поддержанной техники зарубежного изготовления различных брендов. В ограниченных объемах выпускается гусеничная отечественная лесная техника, при этом стоит отметить попытки разработки и внедрения отечественной колесной лесозаготовительной техники на базе зарубежных комплектующих [6, 14, 15].

В условиях ограниченного выбора лесной техники интерес представляют китайские лесозаготовительные машины: гусеничные харвестеры на базе экскаваторов и колесная лесная техника [11]. Анализ работы гусеничных китайских харвестеров на базе экскаваторов, на примере Sany SY245F с харвестерной головкой Waratah H480C, показал их достаточную эффективность в сравнении с лесозаготовительными машинами альтернативных брендов. В то же время, несмотря на относительно небольшую стоимость и универсальность подобных машин, особенности их эксплуатации ограничивают возможность продвижения этих машин на нашем рынке.

Как отмечалось выше, в настоящее время существует возможность приобретения поддержанной зарубежной лесозаготовительной техники таких брендов, как например John Deere. При этом стоимость таких лесных машин с учетом сопутствующих сборов значительно превышает стоимость новой техники китайского и белорусского производства. Однако крупные лесозаготовительные компании склоняются к приобретению подобной техники, высоко оценивая ее надежность и производительность.

Таким образом, в настоящее время все шире распространяются лесозаготовительные машины нового поколения, оснащенные системами интеллектуального управления, которые позволяют существенно повысить уровень автоматизации выполняемых технологических операций [27]. Происходит уточнение характеристик работы систем автоматизации лесозаготовительных машин и влияния на них навыков оператора машины. В условиях активного внедрения систем помощи оператору становится важной подготовка специалистов, поддерживающих работу средств интеллектуализации лесозаготовительного процесса. Однако у специалистов компаний, эксплуатирующих подобную технику, нет полного понимания уровня воздействия таких систем на эффективность осуществления производственных процессов. Исследование эффективности работы лесосечных машин с системой интеллектуального управления будет способствовать расширению знаний о возможностях техники, оснащенной такими системами.

Объекты и методы исследования

Ведущие зарубежные производители лесозаготовительной техники (John Deere, Ponsse и т. д.) постоянно совершенствуют свою технику, внедряя инновационные технологии [9, 12]. Примером здесь может являться использование на лесных машинах системы частичной автоматизации управления гидроманипулятором IBC (Intelligent Boom Control) [13].

Развитие многофункциональных систем управления и измерения лесозаготовительных машин способствует улучшению управляемости, повышению эффективности работы и предоставляет новые возможности мониторинга функционирования машины и состояния самой системы [26]. К таким системам управления относятся TimberMatic, IBC, Ponsse Opti Control, Ponsse Active Crane, MaxiXT и др.

Система автоматизации управления лесозаготовительными машинами IBC компании John Deere Forestry применяется для автоматизации управления манипуляторами харвестеров и форвардеров. Появление системы IBC связано с необходимостью повышения точности управления и обеспечения плавности движения звеньев манипулятора – стрелы, рукояти и телескопического удлинителя.

Управление гидроманипулятором традиционно реализуется за счет последовательного изменения состояний гидроцилиндров стрелы, рукояти и телескопического удлинителя для наведения рабочего органа на дерево, обеспечивая при этом необходимое быстродействие и оптимальное пространственное расположение элементов манипулятора.

Особенностью системы IBC является одновременная работа приводов элементов манипулятора при однонаправленном воздействии на джойстик. В частности, при перемещении левого джойстика вперед или назад выполняется совместное одномоментное управление приводом стрелы, рукояти и телескопического удлинителя, что влечет к прямолинейному перемещению рабочего органа относительно земли. При этом оператор может настраивать общую скорость работы манипулятора, а включение и выключение системы IBC осуществлять нажатием одной клавиши. Наличие дополнительного электрического демпфирования в конце хода цилиндров гидроманипулятора способствует снижению нагрузки на его конструкцию, за счет чего манипулятор работает плавно и без ударов.

Проанализировав работу параллельных манипуляторов, компания Ponsse предложила телескопические варианты конструкций, отличающиеся высокой кинематической точностью и компактностью (короткой поворотной колонной и выдвижной телескопической стрелой). Система управления Ponsse также реализует совместное действие приводов колонны и телескопической стрелы при активации функции «управление телескопом и движением колонны». При включении этой функции автоматически выполняются выдвижение и складывание телескопического удлинителя стрелы и наклон колонны. За счет этого агрегируемая харвестерная головка надвигается на дерево по кратчайшей траектории. При отключении функции (при ручном управлении) потребуются воздействие на 2 джойстика, которые отвечают за работу колонны и стрелы, а также поднятие рычага вверх на левом джойстике для осуществления подачи телескопической стрелы. Внедрение подобных систем открывает перспективы для дальнейшей автоматизации лесозаготовительных машин.

В исследования по автоматизации лесозаготовительных машин с применением систем интеллектуального управления внесли вклад отечественные и зарубежные научные коллективы и фирмы-производители многооперационных машин, например John Deere Forestry, Ponsse Oyj, Palfinger AG и т. д. Изысканиями в данной области занимались J. Manner, A. Mörk, M. Englund, A. Visala, P. Forsman, A. Shiriaev, P. Forsman и др. [2, 19, 22, 23].

Специалистами и учеными рассматриваются вопросы автоматизации технологических операций, выполняемых с помощью манипулятора, с применением интеллектуальных систем управления и их влияние на производительность лесных машин. В частности, по данным исследования [2], использование системы IBC для автоматизации управления манипуляторами форвардеров John Deere 1510E и John Deere 1910G, работающих под управлением опытных операторов, приводит к снижению затрат времени для операций погрузки и разгрузки на 5,2 и 7,9 % соответственно. Затраты времени на работу манипулятора зависят и от скорости его работы, которую оператор может задавать в пользовательском интерфейсе системы управления машиной. В работе [28] отмечается, что пространственное расположение лесоматериалов оказывает влияние на составляющие затрат времени на выполнение отдельных операций форвардера, при этом, как отмечают исследователи [4, 5, 17], обязательно учитывать природные и производственные условия.

При изучении эффективности систем автоматизации лесозаготовительных машин в первую очередь обращается внимание на влияние таких систем на экономические показатели производства [3]. Однако в реальности системы автоматизации лесозаготовительных машин оказывают действие не только на экономическую эффективность производства, но и на другие аспекты выполнения производственных процессов [4, 28]. В частности, следует обратить внимание на психофизиологические условия работы операторов [24].

В работе [29] установлено, что использование системы IBC на форвардерах дает ощутимый эффект только для неопытных операторов или с минимальным обучением. Отмечен рост производительности более чем на 25 % в начале работы операторов. Рост происходит за счет увеличения совмещенных движений манипулятора и траектории движения концевой части манипулятора. Непосредственный экономический эффект обусловлен снижением количества поврежденных машины более чем на 50 %. При этом опытные операторы показали меньшие

результаты – логика управления работой гидроманипулятора противоречила навыкам данных операторов. Наиболее важным фактором эффективности работы является не способ управления гидроманипулятором, а опыт оператора.

Исследование [22] подтверждает выводы о необходимости обучения операторов. Кроме того, отмечается увеличение скорости перемещения концевой части манипулятора и снижение высоты его перемещения, что говорит об удобстве использования системы IBC на форвардерах, а также ведет к снижению времени на вынос и возврат манипулятора к кузову.

Применение нескольких технологий управления дает дополнительный эффект [21]. Выяснилось, что продолжительность технологического цикла снизилась при одновременном использовании системы IBC и системы выравнивания кабины на 14 %, при этом использование только системы выравнивания кабины почти не дает эффекта.

В работе [23] указывается на уменьшение продолжительности технологического цикла при заготовке сдвоенных и многовершинных деревьев при использовании харвестеров, оснащенных системой IBC.

В отчете [18] описана работа 2 комплексов на базе харвестеров, при этом один из них оснащен системой IBC. Производительность харвестера с системой IBC составила 26,63 м³/га, а без нее – 22,17 м³/га, при этом харвестер с IBC был задействован на рубках прореживания, а харвестер без IBC – на сплошных рубках. Указанные результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности названной системы.

В обзоре [25] применение средств автоматизации, схожих с системой IBC, необходимо рассматривать не только как способ повышения производительности, но и путь к роботизации лесозаготовительных машин и процесса в целом.

В исследовании [20] также показано ускорение работ при сборе и выгрузке сортиментов форвардером при включенной системе IBC, которое составило от 3,5 до 14,4 % в контролируемых условиях и от 17,7 до 21,7 % – в естественных. Разница в производительности обусловлена навыками операторов, при этом выводов аналогичных [29] не отмечено.

Таким образом, цель исследования сформулируем следующим образом: провести анализ эффективности колесных и гусеничных харвестеров с учетом влияния современных систем управления гидроманипулятором. Для этого необходимо решить следующие задачи: 1. Формирование базы данных и оценка фактических показателей работы харвестера на базе экскаватора Sany SY245F, харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера John Deere 1270G 8WD, оснащенного системой IBC. 2. Построение статистической модели посредством регрессионных зависимостей, описывающей эффективность харвестеров в исследуемых природно-производственных условиях. 3. Обоснование выводов и выработка рекомендаций по применению колесных и гусеничных харвестеров.

Проведена сравнительная оценка работы харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера на базе экскаватора Sany SY245F. Год выпуска харвестера John Deere – 2018, двигатель – John Deere Power Tech 6090 мощностью 190 кВт, гидроманипулятор – CN7, максимальный вылет – 9,8 м. Год выпуска второго из рассматриваемых харвестеров – 2022, двигатель – Isuzu-CC-6BG1 мощностью 128,5 кВт при 2100 об./мин, максимальный вылет манипулятора – 8,85 м. Харвестерная головка в обоих случаях – Waratah H480C [10]. Харве-

стер John Deere 1270G 6WD оснащен традиционной системой управления без автоматизации Conventional Boom Control (CBC).

Анализ полученных данных (табл. 1) показал, что средняя дневная выработка ($H_{\text{выр}}$, м³/чел. · день) Sany SY245F меньше в 1,126 раза по сравнению с харвестером John Deere 1270G 6WD (при разнице объемов ствола в 1,037 раза), при этом расход топлива (q , л/день) у него больше в 1,46–2,00 раза.

Таблица 1

Средние показатели работы харвестеров по результатам исследования [8]
Average harvester performance metrics based on the research findings [8]

Харвестер	$H_{\text{выр}}$	T	$V_{\text{хл}}$
John Deere 1270G 6WD	233,17	15,20	0,27
Sany SY245F	207,67	15,48	0,28

Примечание: T – среднее эффективное время работы в день, ч; $V_{\text{хл}}$ – средний объем ствола, м³.

В связи с появлением на лесозаготовках харвестеров, оснащенных системой IBC, возникла необходимость оценки их работы с учетом новых технических условий, в т. ч. в сравнении с альтернативными лесозаготовительными машинами. Проведен анализ фактических показателей работы харвестера на базе экскаватора Sany SY245F, харвестера John Deere 1270G 6WD и харвестера John Deere 1270G 8WD (год выпуска – 2023, двигатель и гидроманипулятор – аналогичные John Deere 1270G 6WD, максимальный вылет – 10 м, система управления манипулятором – IBC). Необходимые фактические данные для расчета и анализа производительности машин были предоставлены специалистами АО «Кондопожское лесопромышленное хозяйство» [1, 7].

Природно-производственные условия исследования: Республика Карелия, Кондопожское центральное лесничество, Сандальское участковое лесничество, урочище Сандальское, делянки (лесосеки) № 5 и 27. На территории выполнена сплошная рубка спелых и перестойных насаждений. Средний объем ствола составил: John Deere 1270G 6WD – 0,20 м³; John Deere 1270G 8WD – 0,29 м³; Sany SY245F – 0,24 м³.

Породный состав лесных насаждений на лесосеке № 5 – 6ЕЗБ1Ос+Е+С+Ос, полнота – 0,65, средний запас древесины – 194 м³/га, тип леса – черничник, бонитет – III, класс возраста – VI–VII. Для лесосеки № 27 породный состав лесных насаждений следующий: 5Е4Б1Ос+С+Е+Б+Ос. Полнота – 0,56, средний запас древесины – 180 м³/га, встречающиеся типы леса – черничник, черничники долгомошный и кисличный, бонитет – III–IV, класс возраста – VI–VII.

Средние показатели работы харвестеров представлены в табл. 2.

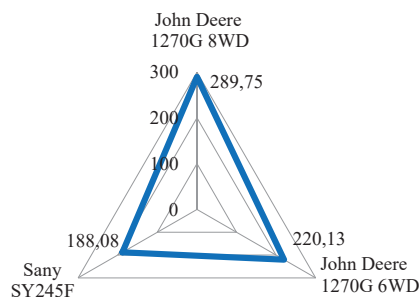
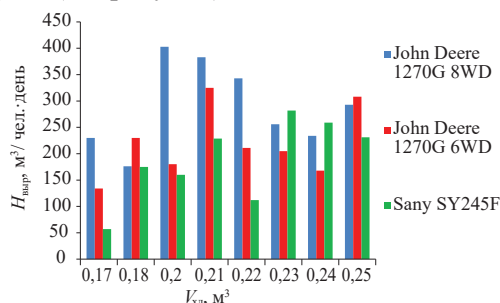
Таблица 2

Средние показатели работы харвестеров
(Кондопожское центральное лесничество)
Average performance metrics for harvesters (Kondopoga central forest district)

Харвестер	$H_{\text{выр}}$	T	$V_{\text{хл}}$
John Deere 1270G 6WD	152,27	8,70	0,20
John Deere 1270G 8WD	319,62	14,57	0,29
Sany SY245F	177,56	12,22	0,24

Результаты исследования и их обсуждение

Сравним дневную выработку при изменении среднего объема ствола дерева (см. рисунок).



Выработка харвестеров при объеме ствола: $a - 0,15-0,25 m^3$; $b - 0,21 m^3$.

Синяя линия на рис. $b - H_{vyr}, m^3/чел. \cdot день$

Harvester output per trunk volume: $a - 0,15-0,25 m^3$; $b - 0,21 m^3$.

Blue line in fig. $b - H_{vyr}, m^3/person \cdot day$

Анализ показал, что выработка John Deere 1270G 8WD выше, чем у John Deere 1270G 6WD, в 2,099 раза, при этом для John Deere 1270G 8WD объем ствола больше в 1,45 раза. С учетом разницы в среднем объеме ствола можно предположить, что производительность John Deere 1270G 8WD будет лучше в 1,32 раза при среднем объеме ствола $0,21 m^3$.

Дневная выработка харвестера на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F меньше, чем у John Deere 1270G 8WD, в 1,8 раза, при этом John Deere 1270G 8WD работал в условиях большего в 1,208 раза объема ствола. Соответственно, с учетом этой разницы производительность John Deere 1270G 8WD выше в 1,54 раза при объеме ствола $0,21 m^3$.

Харвестер на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F имеет большую дневную выработку, чем John Deere 1270G 6WD, в 1,166 раза, при этом John Deere 1270G 6WD работал в условиях меньшего в 1,2 раза объема ствола. С учетом данной разницы выработка John Deere 1270G 6WD выше в 1,17 раза при объеме ствола $0,21 m^3$ (в работе [8] указана разница в 1,126 раза при объеме ствола $0,27-0,28 m^3$).

Средний расход топлива харвестеров John Deere 1270G 6WD и 8WD почти идентичен, у харвестера Sany SY245F – больше в 1,28–1,33 раза (по [8] – в 1,46–2,00 раза).

Для прогнозирования изменения дневной выработки в исследуемых природно-производственных условиях в зависимости от объема ствола, общего рабочего времени ($T_{общ}, ч$), эффективного рабочего времени и расхода топлива разработана статистическая модель на основе регрессионного анализа с использованием полноценных групп. Степень достоверности полученных результатов подтверждается коэффициентом детерминации R^2 . Для харвестера John Deere 1270G 8WD

$$H_{vyr} = 150,56V_{хл} + 8,05287T_{общ} + 4,894T + 0,137917q. \quad (1)$$

Для харвестера John Deere 1270G 6WD

$$H_{vyr} = 140,988V_{хл} - 2,60783T_{общ} + 9,18517T + 0,44601q. \quad (2)$$

Для харвестера на базе экскаватора Sany SY245F

$$H_{\text{выр}} = 71,0066V_{\text{хл}} + 6,67386T_{\text{общ}} + 0,016797T + 0,191254q. \tag{3}$$

Полученные регрессионные уравнения позволяют с высокой достоверностью определить динамику дневной выработки харвестеров в зависимости от основных природно-производственных характеристик лесосеки.

Для подтверждения достоверности полученных данных и оценки тесноты связи дневной выработки харвестеров и среднего объема ствола проведен регрессионный анализ.

Дневная выработка харвестера John Deere 1270G 8WD

$$H_{\text{выр}} = \exp(10,4904\sqrt{V_{\text{хл}}}), \tag{4}$$

коэффициент корреляции – 0,993876;

харвестера John Deere 1270G 6WD

$$H_{\text{выр}} = \exp(11,049\sqrt{V_{\text{хл}}}), \tag{5}$$

коэффициент корреляции – 0,995634;

харвестера на базе экскаватора Sany SY245F

$$H_{\text{выр}} = \exp(10,5138\sqrt{V_{\text{хл}}}), \tag{6}$$

коэффициент корреляции – 0,996438.

В табл. 3 представлены результаты дисперсионного анализа уравнений регрессии (1)–(6).

Таблица 3

Дисперсионный анализ уравнений регрессии
Analysis of variance for regression equations

Источник дисперсии	Сумма квадратов отклонения	Степени свободы	Среднеквадратичное отклонение	Критерий Фишера	R ² , %	Стандартная ошибка	Средняя абсолютная погрешность
Формула (1)							
Модель	5,3187E6	4	1,32967E6	372,71	97,01	59,73	45,47
Остаток	164107,0	46	3567,55				
Всего	5,48281E6	50					
Формула (2)							
Модель	1,07463E6	4	268656,	238,06	96,75	33,59	22,01
Остаток	36113,1	32	1128,53				
Всего	1,11074E6	36					
Формула (3)							
Модель	1,58418E6	4	396044,	169,30	94,82	94,40	48,37
Остаток	86552,4	37	2339,25				
Всего	1,67073E6	41					
Формула (4)							
Модель	1623,21	1	1623,21	3964,10	98,779	0,639904	0,48582
Остаток	20,0644	49	0,409477				
Всего	1643,27	50					
Формула (5)							
Модель	1,07463E6	4	268656,	238,06	99,1288	0,480128	0,316219
Остаток	36113,1	32	1128,53				
Всего	1,11074E6	36					

Окончание табл. 3

Источник дисперсии	Сумма квадратов отклонения	Степени свободы	Среднеквадратичное отклонение	Критерий Фишера	R ² , %	Стандартная ошибка	Средняя абсолютная погрешность
Формула (6)							
Модель	1102,08	1	1102,08	5585,44	99,2889	0,444199	0,352229
Остаток	7,89252	40	0,197313				
Всего	1109,97	41					

Примечание: Р-значение для всех моделей равно 0.

Полученные результаты с высокой степенью достоверности показывают тесную связь между дневной выработкой и средним объемом ствола, позволяя предварительно оценить эффективность исследуемых лесозаготовительных машин при изменении среднего объема ствола в том или ином лесном выделе.

Заключение

Анализ результатов исследования показал преимущество по эффективности (дневной выработке) харвестера John Deere 1270G 8WD, оснащенного системой управления манипулятором IBC, в сравнении с более старой модификацией John Deere 1270G 6WD (в 1,32 раза при среднем объеме ствола 0,21 м³) и харвестером на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F (в 1,54 раза при среднем объеме ствола 0,21 м³). Результаты оценки могут служить доказательством тезиса о повышении эффективности лесозаготовительных машин при внедрении инновационных технологий и совершенствовании системы управления лесозаготовительными машинами. В то же время усложнение системы управления манипулятором повышает стоимость техники и ее эксплуатации, некоторые операторы отмечают трудности при управлении машинами, оснащенными системой IBC, кроме этого, в настоящее время существуют проблемы с приобретением подобных машин в связи с санкционными ограничениями.

Подтверждаются результаты исследования эффективности харвестера на базе гусеничного экскаватора Sany SY245F. Машины подобного класса могут применяться на лесозаготовках с учетом их известных особенностей (перегрев масла в гидравлической системе, повышенный расход топлива, трудности с поставками запасных частей и т. д.), имея преимущество в виде универсальности, простоты конструкций базовой машины и сравнительно невысокой стоимости, что особенно актуально для небольших лесозаготовительных компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акционерное общество «Кондопожское лесопромышленное хозяйство». Режим доступа: <https://klpkh.com/> (дата обращения: 12.08.23).
AO Kondopoga Timber Industry Enterprise: Official Website. (In Russ.).

2. Васенёв М.Ю. Перспективные направления автоматизации современных лесозаготовительных машин // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3(39). С. 125–129.
Vasenev M.Yu. Perspective Trends of Modern Logging Machines Automation. Systems. Methods. Technologies, 2018, no. 3(39), pp. 125–129. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-125-129>

3. Герасимов Ю.Ю., Сибиряков К.Н., Мошков С.Л., Вьяльккю Э., Карвинен С. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин. Йёнссу: НИИ леса Финляндии, 2009. 46 с.

Gerasimov Yu.Yu., Sibiryakov K.N., Moshkov S.L., Vällkyyu E., Karvinen S. *Calculation of Operating Costs of Forest Machines*. Joensuu, Finnish Forest Research Institute Publ., 2009. 46 p. (In Russ.).

4. Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С. Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу. 1998. 178 с.

Gerasimov Yu.Yu., Syunев V.S. *Ecological Optimization of Technological Processes and Machinery for Logging*. Joensuu, Joensuu University Publ., 1998. 178 p. (In Russ.).

5. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. 2020. № 1. С. 55–63.

Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Rudov S.E., Davtyan A.B. Ways to Improve the Efficiency of Forest Machines. *Energia: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2020, no. 1, pp. 55–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0233361920010085>

6. Гусеничный трактор ТСН-4 // Алтайский тракторный завод «Гранд». Режим доступа: <https://tt-4.ru/traktor/> (дата обращения: 25.02.25).

Catterpillar Tractor TSN-4. *Altai Tractor Plant "Grand"*. (In Russ.).

7. Карелия Палп. Режим доступа: <http://karjalapulp.com/> (дата обращения: 12.08.23). *Karelia Pulp*: Official Website. (In Russ.).

8. Кузнецов А.В., Гайда А.А. Сравнительный анализ эффективности харвестеров зарубежного производства // Resources and Technology. Петрозаводск, 2024. Т. 21, № 1. С. 100–112.

Kuznetsov A.V., Gayda A.A. Comparative Analysis of Foreign-Made Harvesters Efficiency. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 100–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2024.7543>

9. Кузнецов А.В., Галактионов О.Н. Анализ производства лесозаготовительных машин в России // Инженерн. вестн. Дона. 2023. № 4. С. 712–722.

Kuznetsov A.V., Galaktionov O.N. Analysis of Forest Machines Production in Russia. *Engineering journal of Don*, 2023, no. 4, pp. 712–722. (In Russ.).

10. Лесной экскаватор // Спецмашинери. Режим доступа: <https://sanysibir.ru/catalog/spetsialnyie-ekskavatoryi/lesnoy-ekskavator/sany-sy245f-gb-ii/> (дата обращения: 03.04.25).

Forest Excavator. *Spetsmashinery*. (In Russ.).

11. Продукция // XUVOL – качество создает будущее: офиц. сайт. Режим доступа: https://ru.xuvol.com/Products_index.html (дата обращения: 25.02.25).

Products. *XUVOL – Quality Shapes the Future*: Official Website. (In Russ.).

12. Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Васильев А.С., Сапожков Д.В., Зайцев В.Г. Обоснование направлений совершенствования лесозаготовительных машин. Петрозаводск: Verso, 2016. 93 с.

Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V., Vasilyev A.S., Sapozhkov D.V., Zaitsev V.G. *Justification of Directions for Improving Logging Machines*. Petrozavodsk, Verso Publ., 2016. 93 p. (In Russ.).

13. Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 1. С. 139–152.

Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Sukhanov Yu.V., Sen'kin V.A. Ergonomic Evaluation of Forestry Crane Partial Automation System. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 139–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-1-139-152>

14. Форвардер МТБ-18 // Производство России: интернет-выставка. Режим доступа: <https://productcenter.ru/products/76868/forwardier-mtb-18> (дата обращения: 25.02.25).

Forwarder MTB-18. *Made in Russia*: Online Exhibition. (In Russ.).

15. Форвардер Тром 20 // Тром. Режим доступа: <https://trom20.ru/> (дата обращения: 25.02.25).

Forwarder Trom 20. *Trom*. (In Russ.).

16. Харвестеры и форвардеры // Амкодор. Каталог. Режим доступа: <https://amkodor.by/catalog/> (дата обращения: 25.02.25).
Harvesters and Forwarders. *Amkodor. Catalogue*. (In Russ.).
17. Apafai A.I., Proto A.R., Borz S.A. Performance of a Mid-Sized Harvester-Forwarder System in Integrated Harvesting of Sawmill, Pulpwood and Firewood. *Annals of Forest Research*, 2017, vol. 60(2), pp. 227–241. <https://doi.org/10.15287/afr.2017.909>
18. Cadei A. *The Eco-Efficiency of Forest Operations in Complex Scenarios and the Role of Harvesting and Transportation System on the Carbon Balance*. PhD Thesis. University of Padova, 2023. 152 p.
19. Eriksson M., Lindroos O. Productivity of Harvesters and Forwarders in CTL Operations in Northern Sweden Based on Large Follow-Up Datasets. *International Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 25, iss. 3, pp. 179–200.
<https://doi.org/10.1080/14942119.2014.974309>
20. Grabowski D., Kowalska J., Bembenek M., Mederski P. Intelligent Boom Control System on Forwarder – Inexperienced Operator Benefits More. *Proceedings of the 56th International Symposium on Forest Mechanization (FORMEC)*. Gdansk, Poland, 2024. 97 p.
21. Hartsch F., Schönauer M., Pohle Ch., Breinig L., Wagner T., Jaeger D. Effects of Boom-Tip Control and a Rotating Cabin on Loading Efficiency of a Forwarder: A Pilot Study. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024, vol. 45, no. 1. 14 p.
<https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2179>
22. Manner J., Gelin O., Mörk A., Englund M. Forwarder Crane's Boom Tip Control System and Beginner-Level Operators. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 2, art. 1717.
<https://doi.org/10.14214/sf.1717>
23. Manner J., Lundström H. The Effect of Forked Trees on Harvester Time Consumption in a *Pinus contorta* Final-Felling Stand. *Silva Fennica*, 2024, vol. 58, no. 4, art. 24039. <https://doi.org/10.14214/sf.24039>
24. Manner J., Mörk A., Englund M. Comparing Forwarder Boom-Control Systems Based on an Automatically Recorded Follow-up Dataset. *Silva Fennica*, 2019, vol. 53, no. 2, art. 10161. <https://doi.org/10.14214/sf.10161>
25. *Robotics and Automation for Improving Agriculture*. Ed. by Prof. J. Billingsley. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019. 326 p.
26. Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Suhanov Yu.V. Statistical Analysis of Forest Machines Ergonomic Parameters. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 93, art. 01023.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301023>
27. Stankic I., Poršinsky T., Tomašić Ž., Tonkovic I., Frntic M. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, no. 33, pp. 61–78.
28. Syuney V.S., Sokolov A.P., Konovalov A.P., Katarov V.K., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., et al. Comparison of Wood Harvesting Methods in the Republic of Karelia. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. Joensuu, Finland, Melta, 2009, no. 120, p. 117.
29. Zemánek T., Filo P. Influence of Intelligent Boom Control in Forwarders on Performance of Operators. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 47–64. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.965>

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