

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2026 Том 16 № 1 (61)

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

Главный редактор

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

Заместитель главного редактора

д.г.н., проф. Н.В. Яковенко

Состав редакционной коллегии

д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)

д.с.-х.н., гл. н.с., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)

д.с.-х.н., проф., академик РАН А.А. Мартынюк
(Россия)

д.б.н., проф. Замоладчиков Д.Г. (Россия)

д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)

д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)

д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)

д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)

д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)

д.б.н., проф. А.А. Гусев (Россия)

к.б.н., проф. К.В. Крутовский (Россия, Германия)

д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)

д-р наук И. Ремеш (Чехия)

д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)

д.т.н., проф. В.А. Зеликов (Россия)

д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)

д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)

д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)

д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)

д.т.н., проф. В.С. Сюнёв (Россия)

д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)

д-р наук, ст. науч. сотрудник

Клиссия Барбоза Мастранджело (Бразилия)

д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)

д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)

проф. Дингуо Чжоу (КНР)

д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)

д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)

д-р наук, проф. Н. Билир (Турция)

д-р наук, проф. Я. Седлячик (Словакия)

д-р наук М. Ахмади-Афзади (Иран)

д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)

д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)

д-р наук А. Монтагноли (Италия)

д-р наук Янг Пэнг (КНР)

д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)

д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)

д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

Технический секретарь

С.Ю. Крохотина

Компьютерная верстка

С.Ю. Крохотина

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-66384 от 14.07.2016 г.

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

ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

телефон (473) 253-72-90

факс (473) 253-76-51

e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2026

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

**Scientific Journal
2026 Vol. 16 № 1 (61)**

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

Editor-in-Chief

Dr., Prof. M.V. Drapalyuk

Deputy Editor-in-Chief

Dr., Prof. N.V. Yakovenko

Members of Editorial Board

Dr., Prof., RAS Academician N.N. Dubenok (Russia)

Dr., Prof., RAS Academician K.N. Kulik (Russia)

Dr., Prof. RAS Academician A.A. Martynyuk (Russia)

Dr., Prof. Zamolodchikov D.G. (Russia)

Dr., Prof. D.N. Afonichev (Russia)

Dr., Prof. E.V. Ageev (Russia)

Dr., Prof. L.I. Belchinskaya (Russia)

Dr., Prof. N.N. Matveev (Russia)

Dr., Prof. S.M. Matveev (Russia)

Dr., Prof. A.A. Gusev (Russia)

Dr0., Prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)

Dr., Prof. S.S. Morkovina (Russia)

Dr. J. Remeš (Czech Republic)

Dr., Prof. V.A. Zelikov (Russia)

Dr., Prof. A.M. Tsypuk (Russia)

Dr., Prof. P. Tylek (Poland)

Dr., Prof. O.N. Burmistrova (Russia)

Dr., Prof. I.V. Grigoriev (Russia)

Dr., Prof. A.S. Manaenkov (Russia)

Dr., Prof. V.V. Rubtsov (Russia)

Dr., Prof. V.S. Syunev (Russia)

Dr., Prof. N.N. Kharchenko (Russia)

Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)

Dr. P. Tylek (Poland)

Dr. S.V. Rebko (Belarus)

Prof. Zhou Dingguo (PRC)

Dr., prof. A. Marcomini (Italy)

Dr., Prof. V. Podrazsky (Czech Republic)

Dr., Prof. N. Bilir (Turkey)

Dr., Prof. J. Sedliačik (Slovakia)

Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)

Dr., Prof. V. Ivetić (Serbia)

Dr., Prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)

Dr. A. Montagnoli (Italy)

Dr. Yong Pang (PRC)

Dr., Prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)

Dr., Prof. A. Kheloufi (Algeria)

Dr., Prof. C. Palaghianu (Romania)

Technical Secretary

S.Yu. Krokhotina

Typesetting

S.Yu. Krokhotina

The journal is registered by
the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology and
Communications

Registration certificate
PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be reproduced only with
written permission of the editorial board

FSBEI HE «VSUFT»
394087, Voronezh, Timiryazev str., 8,
Phone: +7(473) 253-72-90,
Fax: +7(473) 253-76-51,
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Petrin R.D. Summary Comparative Studies on the Relationship Between Thickness and Height Structures of Stands of Different Tree Species	7
Артемихина (Тюткова) Е.А., Жила С.В., Кулаков С.С., Демидко Д.А., Данилюк Ю.В., Анискина А.А. Термогравиметрический анализ древесины кедра сибирского (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour) на разных стадиях усыхания, произрастающего в Северо-Восточной Тыве	20
Кулик К.Н., Таныкевич В.В., Кулик А.К., Таныкевич В.В. Мелиоративная эффективность полезащитных лесных полос с участием <i>Prunus armeniaca</i> L. в Ростовской области	37
Лебедев А.В., Захаров В.П., Коротков С.А. Изменения основных таксационных характеристик лесного фонда Подмосковной Мещеры в первой четверти XXI века	52
Ложкин Г.И., Григорьев А.А., Вьюхин С.О., Чижикова Н.А. Анализ региональных кривых роста <i>Picea obovata</i> Ledeb. на Южном Урале	69
Мерзленко М.Д., Брынцев В.А., Коженкова А.А. Особенности строения лесных культур сосны, созданных различной густотой посадки	88

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

Petrin R.D. Summary Comparative Studies on the Relationship Between Thickness and Height Structures of Stands of Different Tree Species	7
Artemikhina (Tyutkova) E.A., Zhila S.V., Kulakov S.S., Demidko D.A., Danilyuk Yu.V., Aniskina A.A. Thermogravimetric analysis of Siberian cedar wood (<i>Pinus sibirica</i> Du Tour) at different stages of dieback, growing in North-Eastern Tuva	20
Kulik K.N., Tanyukevich V.V., Kulik A.K., Tanyukevich V.V. Reclamation efficiency of forest shelterbelts with <i>Prunus armeniaca</i> L. in the Rostov Region	37
Lebedev A.V., Zakharov V.P., Korotkov S.A. Changes in the Main Forest Inventory Characteristics of the Forest Fund in the Moscow Meshchera Region during the First Quarter of the 21st Century	52
Lozhkin G.I., Grigoriev A.A., Vyukhin S.O., Chizhikova N.V. Analysis of regional growth curves of <i>Picea obovata</i> Ledeb. in the Southern Urals	69
Merzlenko M.D., Bryntsev V.A., Kozhenkova A.A. Structural features of pine forest crops created at various planting densities	88

Серебряков О.В., Яковенко Н.В. Влияние декадных температур весеннего сезона на фенологические сдвиги <i>Betula pendula</i> Roth. и <i>Tilia cordata</i> Mill. в условиях урбоэкосистемы (на примере г. Воронежа)	98	Serebryakov O.V., Yakovenko N.V. The influence of decade temperatures of the spring seas on the phenological shifts of <i>Betula pendula</i> Roth. and <i>Tilia cordata</i> Mill. in the conditions urban ecosystem (using the example of Voronezh city)	98
Харитонов З.А., Коптев С.В. Моделирование таксационных характеристик насаждений сухопутной территории Арктики с использованием аллометрических уравнений и данных дистанционного зондирования	113	Kharitonova Z.A., Koptev S.V. Modeling of the taxation characteristics of tree stands in the Arctic land area using allometric equations and remote sensing data	113
ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ		TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT	
Васильев Д.В., Боргонутдинов А.М., Сибиряткин Е.В., Куницкая О.А., Тихонов Е.А. Экспериментальное исследование эволюции поля напряжений в грунте при катковом уплотнении	127	Vasiliev D.V., Borgonutdinov A.M., Sibiryatkin E.V., Kunitskaya O.A., Tikhonov E.A. Experimental investigation of stress field evolution in soil under roller compaction	127
Драпалюк М.В., Школьных А.В. Моделирование процесса ленточной подачи саженцев в лесопосадочном аппарате на основе метода дискретных элементов	141	Drapalyuk M.V., Shkolnykh A.V. Modeling the process of belt feeding of seedlings in a forest planting machine based on the discrete element method	141
Петруша С.В., Тихонов Е.А., Морковин В.А., Куницкая О.А., Перфильев П.Н., Ревяко С.И. Экспериментальная верификация теоретической модели функционирования паровой винтовой машины ПВМ-200 для энергообеспечения лесных терминалов	160	Petrusha S.V., Tikhonov E.A., Morkovin V.A., Kunickaya O.A., Perfil'ev P.N., Revyako S.I. Experimental verification of the theoretical model of operation of the PVM-200 steam screw expander machine for power supply of forest terminals	160

Полумиско А.А., Попиков П.И., Камалова Н.С., Евсиков И.Д., Путятин П.А.
Исследование динамики гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством 174
Рогулин Р.С.

Двухэшелонная транспортная задача и транзитные вершины в лесопромышленном производстве: модель оптимизации 191

Четверикова И.В., Попикова А.В., Боровиков Р.Г., Зимарин С.В., Попиков С.К.
Оценка динамической нагруженности и надежности механизма подъема стрелы манипулятора лесотранспортной машины с пневмогидравлическим демпфирующим устройством на стадии проектирования 209

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Карпачевский М.Л., Яницкая Т.О., Шматков Н.М., Шварц Е.А.
Добровольная лесная сертификация как инструмент сдерживания климатических изменений и адаптации лесов к ним 229

ЭКОЛОГИЯ

Валекжанин А.А., Сунгурова Н.Р., Бабич Н.А., Залывская О.С., Лазарева И.В.
Комплексная оценка эффективности озеленения объектов ландшафтной архитектуры (на примере г. Архангельска) 247

Polumisko A.A., Popikov P.I., Kamalova N.S., Evsikov I.D., Putyatin P.A.
Study of the dynamics of the hydraulic drive of the boom lifting mechanism of a forestry manipulator with a magnetic damping device 174
Rogulin R.S.

Two-Echelon Transportation Problem and Transshipment Nodes in Forest Industry Production: An Optimization Model 191

Chetverikova I.V., Popikova A.V., Borovikov R.G., Zimarin S.V., Popikov S.K.
Assessment of the dynamic load and reliability of the boom lifting mechanism of a logging machine with a pneumohydraulic damping device at the design stage 209

NATURE MANAGEMENT

Karpachevskiy M.L., Yanitskaya T.O., Shmatkov N.M., Shvarts E.A.
Voluntary forest certification as an instrument of climate change mitigation and forest adaptation 229

ECOLOGY

Valekzhanin A.A., Sungurova N.R., Babich N.A., Zalyvskaya O.S., Lazareva I.V.
Comprehensive assessment of landscaping efficiency landscape architecture objects (using the example of Arkhangelsk) 247

Мамаева Н.А., Хохлачева Ю.А. Интродукция сортов бородатых ирисов, перспективных для использования в озеленении	269	Mamaeva N.A., Khokhlacheva J.A. Introduction of cultivars of bearded irises promising for use in urban landscaping	269
Харченко Н.Н., Цепляев А.Н., Колесниченко Е.А., Рыбалкина Н.В., Тунякин В.Д. Лесомелиоративный потенциал защитного лесоразведения в Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации	283	Kharchenko N.N., Tseplyaev A.N., Kolesnichenko E.A., Rybalkina N.V., Tunyakin V.D. Forest reclamation potential of protective afforestation in the Central Forest-Steppe of the European part of the Russian Federation	283



Summary Comparative Studies on the Relationship Between Thickness and Height Structures of Stands of Different Tree Species

Rumen Dimitrov Petrin ✉ lesni4eja2014@gmail.com

Forest Research Institute of the Bulgarian Academy of Sciences, 132 Kliment Ohridski Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria

Abstract

This study summarizes twelve years of research on the structure of forest stands of different tree species, focusing on the relationship between diameter distributions (thickness structure) and height–diameter curves (height structure). Based on numerous sample plots, the analysis compares distribution curves of the number of trees by diameter classes relative to the mean diameter (d_{av}), and corresponding average height curves. Two newly introduced indicators – the asymmetry index (I_{as}) for thickness structure and the steepness index (I_{st}) for height structure – provide simple and practical tools for analyzing the dynamics of stand structure. Results demonstrate that all studied species (spruce, fir, Scots pine, seed-origin beech, seed-origin oak, coppice oak, and Scots pine plantations) show right-skewed asymmetry in diameter distribution, which corresponds to steeper height curves. Comparisons with Tyurin's Unified Curve (1938) confirm the validity of these findings. The relationship between asymmetry and steepness makes it possible to evaluate stand productivity and wood volume potential more effectively.

Keywords: *stand structure, diameter distribution, asymmetry index, steepness index, tree species, stand productivity, wood volume*

For citation: Petrin R. D. Summary Comparative Studies on the Relationship Between Thickness and Height Structures of Stands of Different Tree Species (2026). Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/1>.

Received 23.12.2025. *Revised* 29.01.2026. *Accepted* 15.03.2026. *Published online* 27.03.2026.

Introduction

The regularities in the structure of forest stands form the basis for creating adequate models for assessing the amount of timber in the forest and its assortment structure. The present author, over a period of 12 years, using a sufficient number of sample plots (SP) for stands of various tree species, has studied the distribution curves of the number of trees (N) by diameter classes to establish the symmetry or asymmetry in this distribution relative to the average diameter d_{av} . On the basis

of the same sample plots, height curves were also studied, representing average heights (H_{av}) by diameter classes for a given stand. The results have been published in 13 publications [10–22].

In this work, an attempt is made to summarize the results of these studies by comparing two types of stand structures – by thickness (N_d) and by height (H) – for the following tree species (TS): spruce, fir, Scots pine, seed-origin beech, seed-origin oak, coppice oak, and Scots pine plantations.

The distribution curves are studied in relation to the average diameter (d_{av}), which according to forest inventory science (Weise's rule) for even-aged stands divides the total number of trees into two unequal parts: about 60% thinner and 40% thicker. When we have 57% thinner trees, the distribution is considered symmetrical (based on A. Tyurin's Unified Curve, 1938). Right asymmetry occurs when the number of trees thicker than d_{av} predominates, which is advantageous from the viewpoint of wood volume and assortment structure. Steepness, on the other hand, characterizes the height curves (H) and shows the magnitude of height H increase between diameter classes; under otherwise equal conditions, stands with steeper curves are more productive.

Da Silva et al. (2024), using NLME (Nonlinear Mixed-Effects) models, established the parameters of the height–diameter (H–D) relationships at different stand densities. The steepness index (I_{st}) (Petrin, 2021, 2022, 2023a, 2024, 2025) can be used as a simpler and more accessible alternative to the steepness parameters bbb , reflecting the influence of competition (stand density) on the steepness of the height curves.

Ciceu et al. (2020, 2023), studying H–D models for the structure of broadleaved tree species, found that environmental conditions affect the shape and steepness of height curves. I_{st} allows direct comparison of this dynamic without complex parameterization.

Bronisz & Mehtätalo (2020), with hierarchical NLME models, show that competition and stand density influence the shape (steepness) of H–D curves. I_{st} is functionally similar to their steepness indicators and can also serve as a simpler and more directly computable measure in similar studies.

In mixed stands, Siipilehto et al. (2023) investigated the shape of H–D curves depending on species interactions. I_{st} can summarize these differences, providing the possibility for a practical forestry interpretation.

MacPhee et al. (2018) found that H–D model parameters reflect the rate of height development depending on stand density. I_{st} represents a direct and simpler alternative for comparing curves at different degrees of competition.

The Weibull function, used in studies by Bailey & Dell (1996), describes diameter distributions through the shape parameter kkk , which indicates the degree of asymmetry. The

asymmetry index (I_{as}) of Petrin (2023, 2024), which is directly calculated from the cumulative curve, is analogous to kkk .

Ciceu, Pitar, and Badea (2021) analyzed diameter distributions in mixed, uneven-aged stands in the Southern Carpathians (Romania). The main objective was to develop statistical models describing the structure of diameter classes and their dynamics under varying age and spatial heterogeneity. The authors used flexible probability functions, including Weibull, to describe the actual distribution of tree numbers by diameter and to assess their accuracy. It was shown that in uneven-aged stands, distributions are often asymmetric, skewed toward smaller diameters. This tendency can also be interpreted using Petrin's asymmetry index, which numerically captures deviations of the distribution from symmetry.

In their study, Lee, D.; Siipilehto, J.; Miina, J.; Niemistö, P.; Haapanen, M.; Hynynen, J.; Huuskonen, S. (2024) used a site index and models of stand characteristics for silver birch plantations in southern and central Finland. By analyzing heights and diameters in plantation conditions, they showed that tree size distributions are often approximately normal or slightly skewed. Here, asymmetry is linked to productivity assessment. In fast-growing species, the distribution is more balanced (Weibull $k \approx 3.5 - 4.0$ \approx 3.5–4.0, i.e., slight negative skew), meaning that Petrin's asymmetry index (2024, 2025) would have moderate values. On poorer soils and in more uneven stands, a clearer positive skew appears (trees predominantly on the left of the average, leading to lower values of Petrin's asymmetry indices).

Lebedev, A. V.; Kuzmichev, V. V. (2020) tested the applicability of simple 2- and 3-parameter models for the height–diameter relationship of birch (*Betula pendula* and *Betula pubescens*) in the European part of Russia. The main models used were Monamur, Korf, Näslund, etc. The authors recommend using such models for forest management purposes and for stock predictions.

Lebedev, A. V. (2020), based on a large number of sample plots of varying age, site quality, and density, developed new generalized $h=f(d)$ $h=f(d)$ models for birch stands in European Russia. He introduced generalized nonlinear functions valid for all stands.

Objects and Methods

The author's publications on the stands of the above-mentioned tree species are listed in the References.

The formulas used in the study are as follows:

Relative curves q_x , two types:

1. Distribution curves of the number of trees:

$$q_{Nx} = N_k / N_{d_{av}} (1),$$

where N_k is the number of trees in the respective diameter class, and $N_{d_{av}}$ – the number of trees corresponding to the mean diameter.

2. Height curves:

$$q_{Hx} = H_k / H_{av} (2),$$

where H_k is the height in the respective diameter class, and

H_{av} – the average height of the stand.

Cumulative distribution curve
Regardless of the type of distribution – relative or absolute – the cumulative distribution curve is calculated, which represents a constantly increasing

The asymmetry coefficient represents THE RATIO of the number of trees up to the central diameter class (d_{av}) plus half of the number corresponding to it, to the total number (in relative form – 100% or 1.0).

Asymmetry index of the distribution

$$I_{as} = N_{sum_{\Omega}} / N_{sum_m} (5),$$

where:

$N_{sum_{\Omega}}$ – the total number of trees (which in the cumulative curve corresponds to the final right-hand diameter class), and

N_{sum_m} – the cumulative number of trees up to and including the mean diameter d_{av} .

Steepness index of the height structure curves

$$I_{st} = H_{\Omega} / H_m (6), \text{ where:}$$

semi-parabolic curve, similar to the usual form of the height curve.

The formula is:

$$N_{sum_x} = N_k + \sum N_{1 \div k} (3), \text{ where:}$$

N_k is the number of trees in a given diameter class k , and $\sum N_{1 \div k}$ – the sum of the numbers of trees in the preceding diameter classes.

The cumulative curve is obtained so that for each diameter class the sum corresponds to the number of trees in all classes up to and including the current one.

Asymmetry coefficient

$$Cas = (\sum N_{1 \div k} + N_{d_{av}} / 2) / \sum N_x (4),$$

where:

$\sum N_{x_{1 \div k}}$ – the sum of the numbers of trees (N_x) up to the diameter class corresponding to d_{av} ,

$N_{d_{av}}$ – the number of trees in the central diameter class,

$\sum N_x$ – the total number of trees in the stand.

H_{Ω} – the height at the end of the studied diameter interval, and

H_m – the height at d_{av} , i.e. the average height of the stand.

Results

In Table 1 the curves and the two asymmetry indicators – the asymmetry coefficient and the asymmetry index – are presented for each tree species. For spruce, for example, the distribution curve is shown first in relative (corresponding to percentage) form, followed by q_x of the same curve (from formula 1), then the cumulative curve is calculated (formula 3), and finally q_x of the cumulative curve or q_x of the asymmetry (again according to formula 1). The average relative distribution curve for all tree species has also been calculated, and similar calculations have been carried out for Tyurin's unified distribution curve.

Table 1

Calculation of asymmetry indicators coefficients and indices of asymmetry

Tree Species	Indicator s	Natural Degrees of Thickness											Asymmetry Coefficient (Cas)
		0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	
Spruce	Nrel	0.07	0.09	0.11	0.14	0.15	0.15	0.11	0.08	0.05	0.03	0.02	0.49

Естественные науки и лес

	qx_N	0.4 7	0.6 0	0.7 3	0.9 3	1.0 0	1.0 0	0.7 3	0.5 3	0.3 3	0.2 0	0.1 3	
	Nsum	0.4 7	1.0 7	1.8 0	2.7 3	3.7 3	4.7 3	5.4 7	6.0 0	6.3 3	6.5 3	6.6 7	
	qx__asi m	0.1 3	0.2 9	0.4 8	0.7 3	1.0 0	1.2 7	1.4 6	1.6 1	1.7 0	1.7 5	1.7 9	
Fir	Nrel	0.0 8	0.1 0	0.1 4	0.1 5	0.1 4	0.1 3	0.0 9	0.0 8	0.0 5	0.0 3	0.0 1	0.54
	qx_N	0.5 7	0.7 1	1.0 0	1.0 7	1.0 0	0.9 3	0.6 4	0.5 7	0.3 6	0.2 1	0.0 7	
	Nsum	0.5 7	1.2 9	2.2 9	3.3 6	4.3 6	5.2 9	5.9 3	6.5 0	6.8 6	7.0 7	7.1 4	
	qx__asi m	0.1 3	0.3 0	0.5 2	0.7 7	1.0 0	1.2 1	1.3 6	1.4 9	1.5 7	1.6 2	1.6 4	
Scots Pine	Nrel	0.0 6	0.0 8	0.1 4	0.1 7	0.1 8	0.1 5	0.1 1	0.0 6	0.0 4	0.0 2	0.0 1	0.53
	qx_N	0.3 3	0.4 4	0.7 8	0.9 4	1.0 0	0.8 3	0.6 1	0.3 3	0.2 2	0.1 1	0.0 6	
	Nsum	0.3 3	0.7 8	1.5 6	2.5 0	3.5 0	4.3 3	4.9 4	5.2 8	5.5 0	5.6 1	5.6 7	
	qx__asi m	0.1 0	0.2 2	0.4 4	0.7 1	1.0 0	1.2 4	1.4 1	1.5 1	1.5 7	1.6 0	1.6 2	
Seed Beech	Nrel	0.0 8	0.1 1	0.1 4	0.1 4	0.1 4	0.1 2	0.1 0	0.0 7	0.0 5	0.0 4	0.0 2	0.54
	qx_N	0.5 6	0.7 5	1.0 0	1.0 0	1.0 0	0.8 8	0.6 9	0.5 0	0.3 8	0.2 5	0.1 3	
	Nsum	0.5 6	1.3 1	2.3 1	3.3 1	4.3 1	5.1 9	5.8 8	6.3 8	6.7 5	7.0 0	7.1 3	
	qx__asi m	0.1 3	0.3 0	0.5 4	0.7 7	1.0 0	1.2 0	1.3 6	1.4 8	1.5 7	1.6 2	1.6 5	
Seed Oak	Nrel	0.0 6	0.1 0	0.1 3	0.1 7	0.1 7	0.1 5	0.1 0	0.0 6	0.0 3	0.0 2	0.0 1	0.54
	qx_N	0.3 6	0.5 8	0.7 5	1.0 4	1.0 0	0.9 0	0.6 0	0.3 5	0.1 9	0.1 3	0.0 6	
	Nsum	0.3 6	0.9 4	1.6 9	2.7 2	3.7 2	4.6 3	5.2 3	5.5 7	5.7 6	5.8 9	5.9 5	
	qx__asi m	0.1 0	0.2 5	0.4 5	0.7 3	1.0 0	1.2 4	1.4 0	1.5 0	1.5 5	1.5 8	1.6 0	
Coppice Oak	Nrel	0.0 6	0.0 9	0.1 2	0.1 7	0.1 7	0.1 6	0.1 0	0.0 6	0.0 3	0.0 2	0.0 1	0.53
	qx_N	0.3 5	0.5 4	0.6 9	1.0 0	1.0 0	0.9 2	0.6 0	0.3 5	0.1 9	0.1 3	0.0 6	
	Nsum	0.3 5	0.8 8	1.5 8	2.5 8	3.5 8	4.5 0	5.1 0	5.4 4	5.6 3	5.7 7	5.8 3	
	qx__asi m	0.1 0	0.2 5	0.4 4	0.7 2	1.0 0	1.2 6	1.4 2	1.5 2	1.5 8	1.6 1	1.6 3	
Scots Pine Plantation s	Nrel	0.0 7	0.1 0	0.1 3	0.1 5	0.1 5	0.1 5	0.1 0	0.0 6	0.0 4	0.0 3	0.0 2	0.52
	qx_N	0.4 4	0.6 3	0.8 8	1.0 0	1.0 0	1.0 0	0.6 9	0.3 8	0.2 5	0.1 9	0.1 3	
	Nsum	0.4 4	1.0 6	1.9 4	2.9 4	3.9 4	4.9 4	5.6 3	6.0 0	6.2 5	6.4 4	6.5 6	
	qx__asi m	0.1 1	0.2 7	0.4 9	0.7 5	1.0 0	1.2 5	1.4 3	1.5 2	1.5 9	1.6 3	1.6 7	
Average	qx_N	0.4 4	0.6 1	0.8 3	1.0 0	1.0 0	0.9 2	0.6 5	0.4 3	0.2 7	0.1 8	0.0 9	0.53

Average Tyurin Curve	NotH.	0.0 4	0.1 0	0.1 6	0.1 8	0.1 8	0.1 3	0.0 9	0.0 6	0.0 3	0.0 2	0.0 1	0.57
	qx_N	0.1 9	0.5 2	0.8 9	1.0 2	1.0 0	0.7 2	0.4 9	0.3 5	0.1 8	0.0 8	0.0 3	
	Nsum	0.1 9	0.7 2	1.6 1	2.6 2	3.6 2	4.3 5	4.8 4	5.1 9	5.3 7	5.4 5	5.4 8	
	qx__asi m	0.0 5	0.2 0	0.4 4	0.7 2	1.0 0	1.2 0	1.3 4	1.4 3	1.4 8	1.5 0	1.5 1	

*- The relative expression of the number of trees N_{rel} corresponds to the percentage.

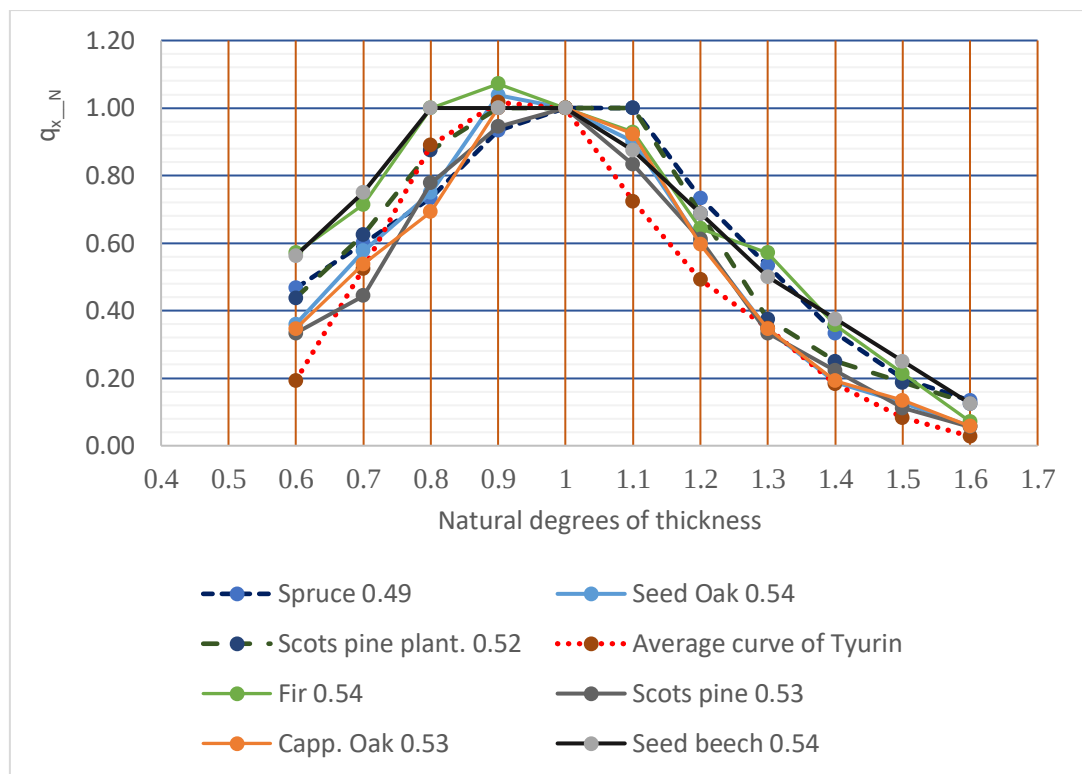


Figure 1. Relative distribution curves - q_{x_N} by tree species

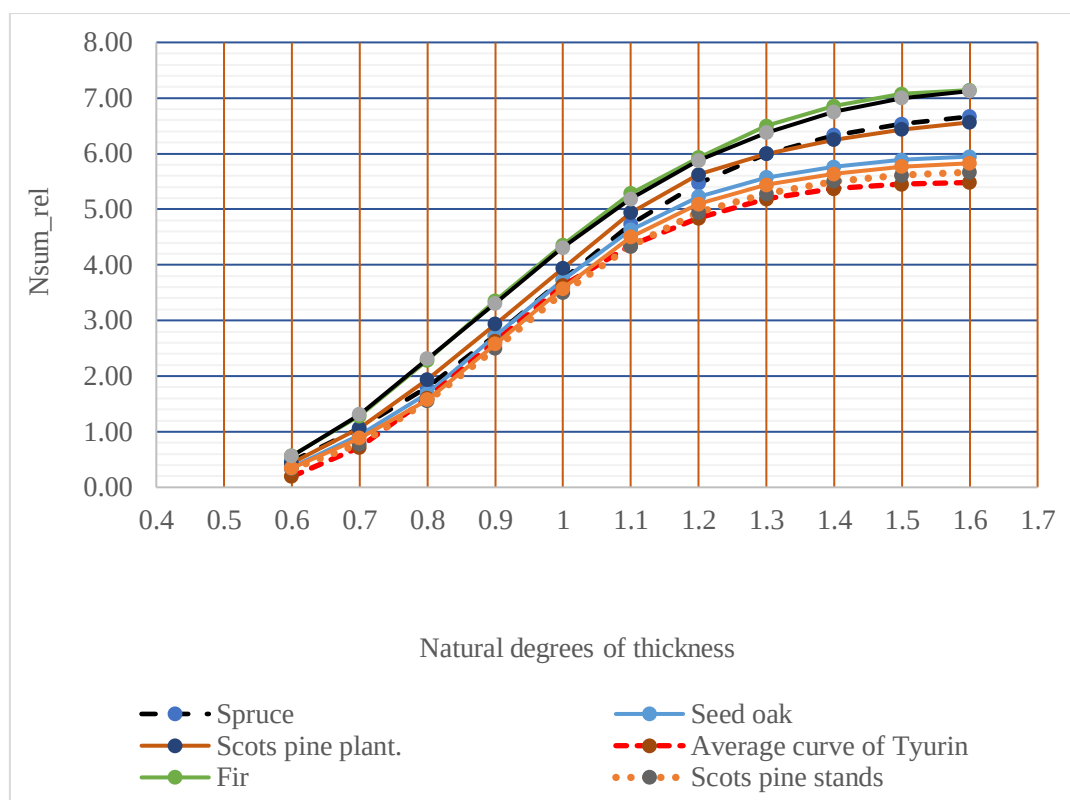


Figure 2. Summary (relative) distribution curves - N_{sum_rel} by tree species

As can be seen from Fig. 2, the cumulative distribution curves are of a form similar to the height curves – rising semi-parabolic curves. (That is why the formulas for I_{as} (f. 3) and for I_{st} (f. 6) are similar in nature.) From the cumulative curves themselves, their steepness cannot be estimated.

All distribution curves (q_x), which are relative with respect to the number of trees corresponding to the mean diameter (NDT = 1.0) , intersect at the abscissa and ordinate point 1.0, and the figure shows the differences in their asymmetry with respect to d_{av} . The corresponding asymmetry

coefficients indicate that the difference in asymmetry is not large for the tree species. That is, all tree species – spruce, fir, Scots pine, seed beech, seed oak, and coppice oak – have very close **ranks of the mean tree**, for which the asymmetry coefficient is the indicator; it varies from 0.49 for spruce to 0.54 for seed beech, oak, and fir. Thus, they all have a right-skewed distribution. The average asymmetry coefficient is **$C_{as} = 0.53$** , while that of **Tyurin's unified curve equals 0.57**. Therefore, relative curves were calculated, called Normal Number Curves, or asymmetry curves, which are presented in Table 2.

Table 2

Curves of normal numbers of summary curves, or asymmetry curves - q_{x_asim}

Tree species	Natural degrees of thickness										
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Spruce	0,13	0,29	0,48	0,73	1,00	1,27	1,46	1,61	1,70	1,75	1,79
Fir	0,13	0,30	0,52	0,77	1,00	1,21	1,36	1,49	1,57	1,62	1,64
Scots pine	0,10	0,22	0,44	0,71	1,00	1,24	1,41	1,51	1,57	1,60	1,62

Seed beech	0,13	0,30	0,54	0,77	1,00	1,20	1,36	1,48	1,57	1,62	1,65
Seed oak	0,10	0,25	0,45	0,73	1,00	1,24	1,40	1,50	1,55	1,58	1,60
Cappice oak	0,10	0,25	0,44	0,72	1,00	1,26	1,42	1,52	1,58	1,61	1,63
Scots pine pl.	0,11	0,27	0,49	0,75	1,00	1,25	1,43	1,52	1,59	1,63	1,67
Average	0,11	0,27	0,48	0,74	1,00	1,24	1,41	1,52	1,59	1,63	1,66
Average curve of Tyurin	0,05	0,20	0,44	0,72	1,00	1,20	1,34	1,43	1,48	1,50	1,51

From Table 2 and Fig. 3 it can be seen that the **asymmetry curves** q_{x_as} intersect at the same abscissa point, corresponding to NDT 1.0, i.e. d_{av} ,

while at the final abscissa point NDT=1.6 the asymmetry index is recorded for the individual tree species.

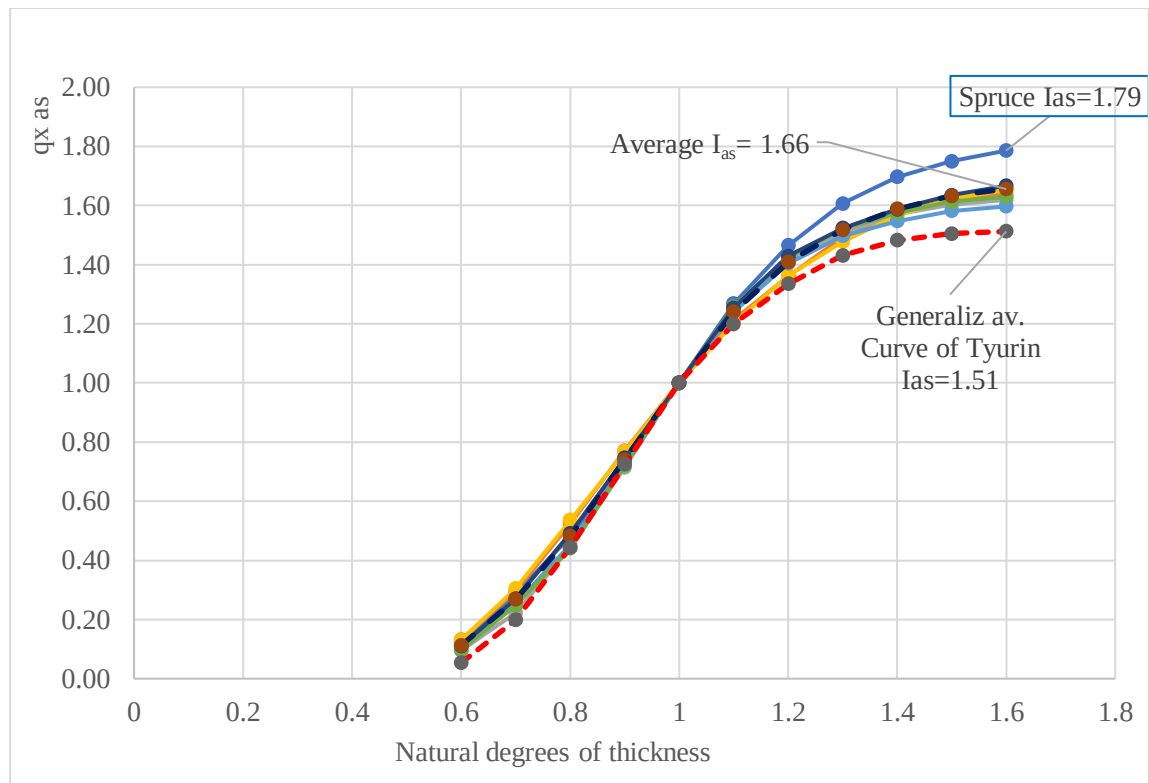


Figure 3. Curves of normal numbers q_{x_asim} of asymmetry

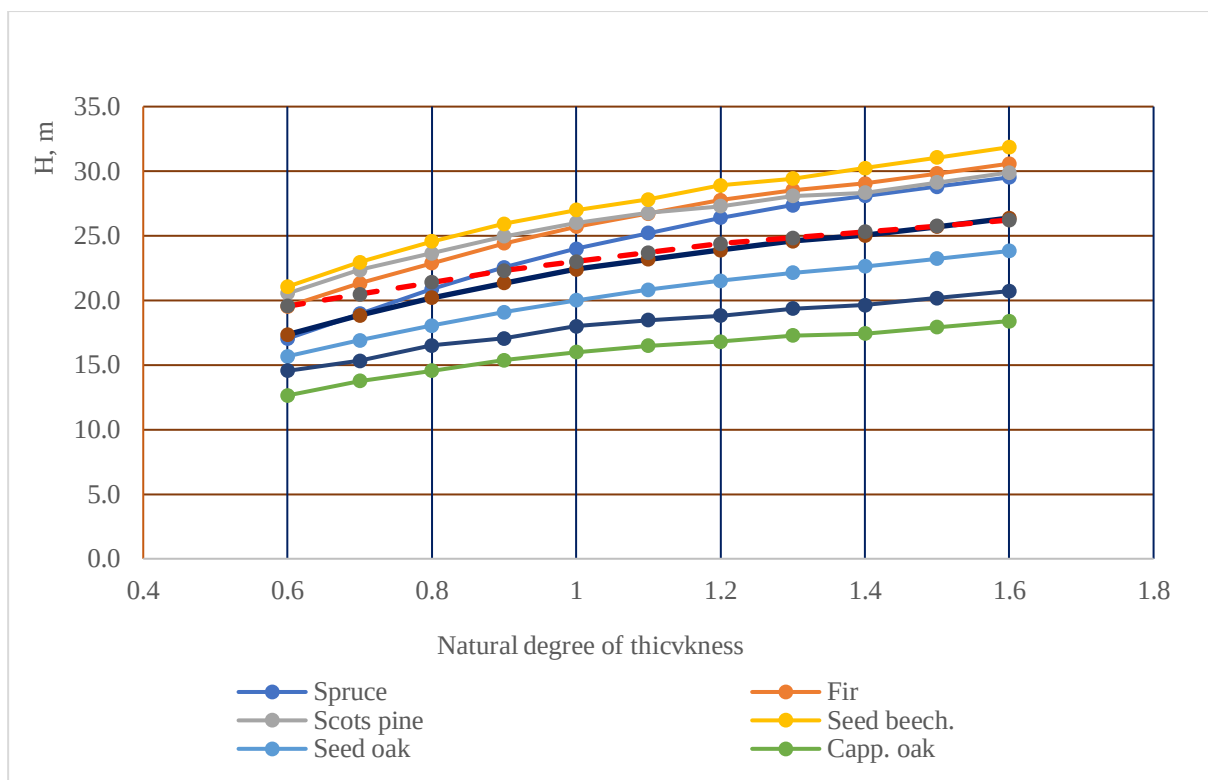


Figure 4. Average absolute height curves by tree species

In Fig. 3 the most characteristic values of the asymmetry indices are shown – the highest is I_{as} of spruce, with the most right-skewed asymmetry – 1.79, the average is 1.66, and the lowest is that of Tyurin's unified curve – 1.51, which corresponds to the SYMMETRICAL type of distribution. The larger the asymmetry index, the more right-skewed it is.

In Fig. 4 the height curves by tree species in meters are shown, also called height structure curves. From the absolute height curves one cannot judge their STEEPNESS. Therefore, relative height curves were calculated in relation to the average height of the respective stands.

Table 3

Average relative height curves by tree species - $q_x H$

Tree species	Natural degrees of thickness										
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Spruce	0,71	0,79	0,87	0,94	1,00	1,05	1,1	1,14	1,17	1,20	1,23
Fir	0,76	0,83	0,89	0,95	1,00	1,04	1,08	1,11	1,13	1,16	1,19
Scots pine	0,79	0,86	0,91	0,96	1,00	1,03	1,05	1,08	1,09	1,12	1,15
Seed beech	0,78	0,85	0,91	0,96	1,00	1,03	1,07	1,09	1,12	1,15	1,18
Seed oak	0,78	0,85	0,90	0,95	1,00	1,04	1,08	1,11	1,13	1,16	1,19
Cappice oak	0,79	0,86	0,91	0,96	1,00	1,03	1,05	1,08	1,09	1,12	1,15
Scots pine pl.	0,81	0,85	0,92	0,95	1,00	1,03	1,04	1,08	1,09	1,12	1,15

Average	0,77	0,84	0,90	0,95	1,00	1,04	1,07	1,10	1,12	1,15	1,18
Average curve of Tyurin	0,85	0,89	0,93	0,97	1,00	1,03	1,06	1,08	1,10	1,12	1,14

In Table 3 and in Fig. 5 the relative height curves q_{x_H} are presented numerically and also illustrated, which again intersect at NDT 1.0. In the last column of the table the steepness indices of the height curves can be seen. And in Fig. 5 it is shown that the steepest height curve is that of spruce, with the highest steepness index – $I_{st} = 1.23$, the average index is 1.18, and the lowest is for Tyurin's unified height curve – 1.14, i.e. there is complete

correspondence between the asymmetry indices (Fig. 3) and the steepness indices.

Figure 6 shows three the mean relative curves - of distribution, asymmetry (from the cumulative distribution), and height steepness for all tree species combined, together with Tyurin's corresponding curves. They intersect at the same abscissa-ordinate point (1.0), enabling direct comparison. Our results indicate higher asymmetry (greater right-hand skewness) and correspondingly higher steepness indices of the height curves (1.66; 1.18) than those of Tyurin (1.51; 1.14).

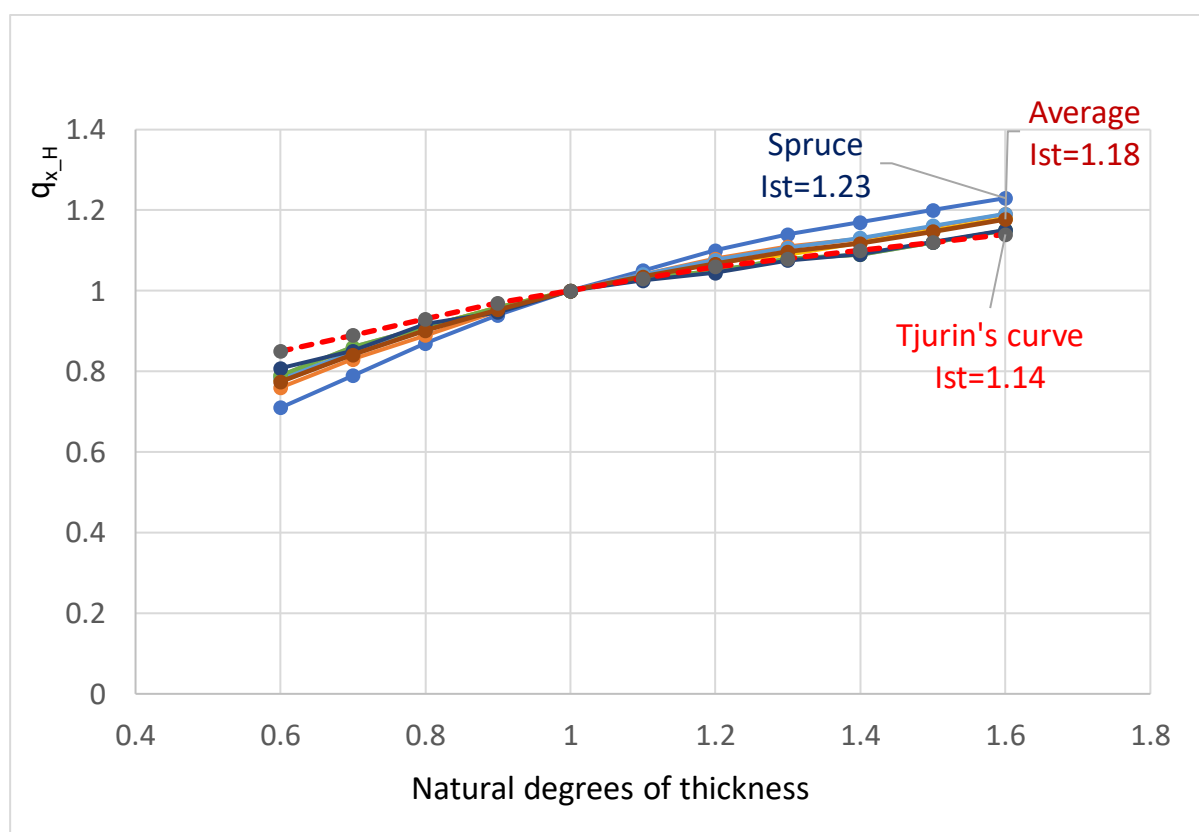


Figure 5. Average relative height curves q_{x_H} by tree species and I_{st}

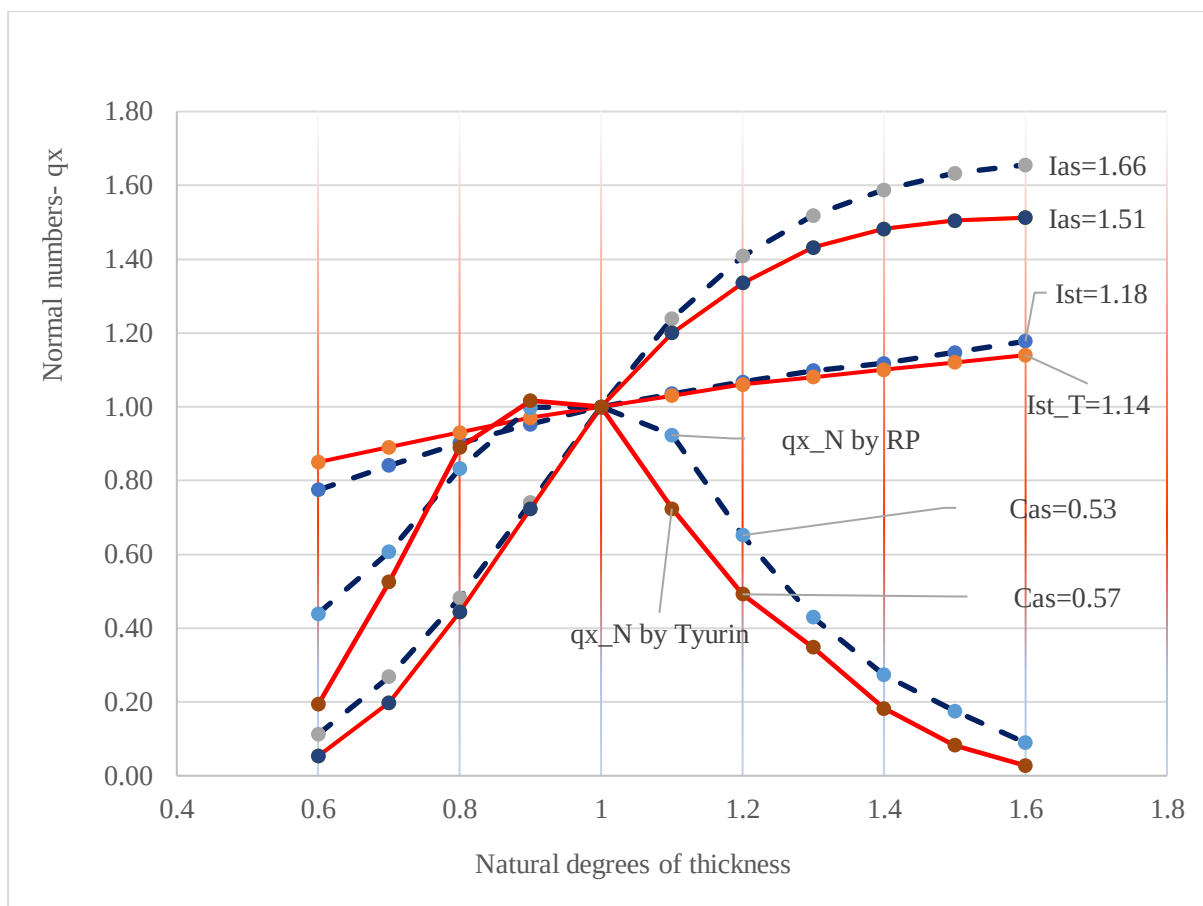


Figure 6. Average curves of distribution (N_d), asymmetry (q_{x_N}), and height (q_{x_H}) – ours and Tyurin's

Table 4

Summary data for C_{as} , I_{as} and I_{st_H}

Tree Species	C_{as}	I_{as}	I_{st_H}
Spruce	0.49	1.79	1.23
Scots Pine Plantations	0.52	1.67	1.15
Coppice Oak	0.53	1.63	1.15
Scots Pine	0.53	1.62	1.15
Seed Beech	0.54	1.65	1.18
Fir	0.54	1.64	1.19
Seed Oak	0.56	1.60	1.19
Average	0.53	1.64	1.17
Average curve of Tyurin	0.57	1.5	1.14

In Table 4 the values of the asymmetry coefficients, and correspondingly the asymmetry indices and the steepness indices, are presented in

ascending order. The same data are illustrated in Fig. 7.

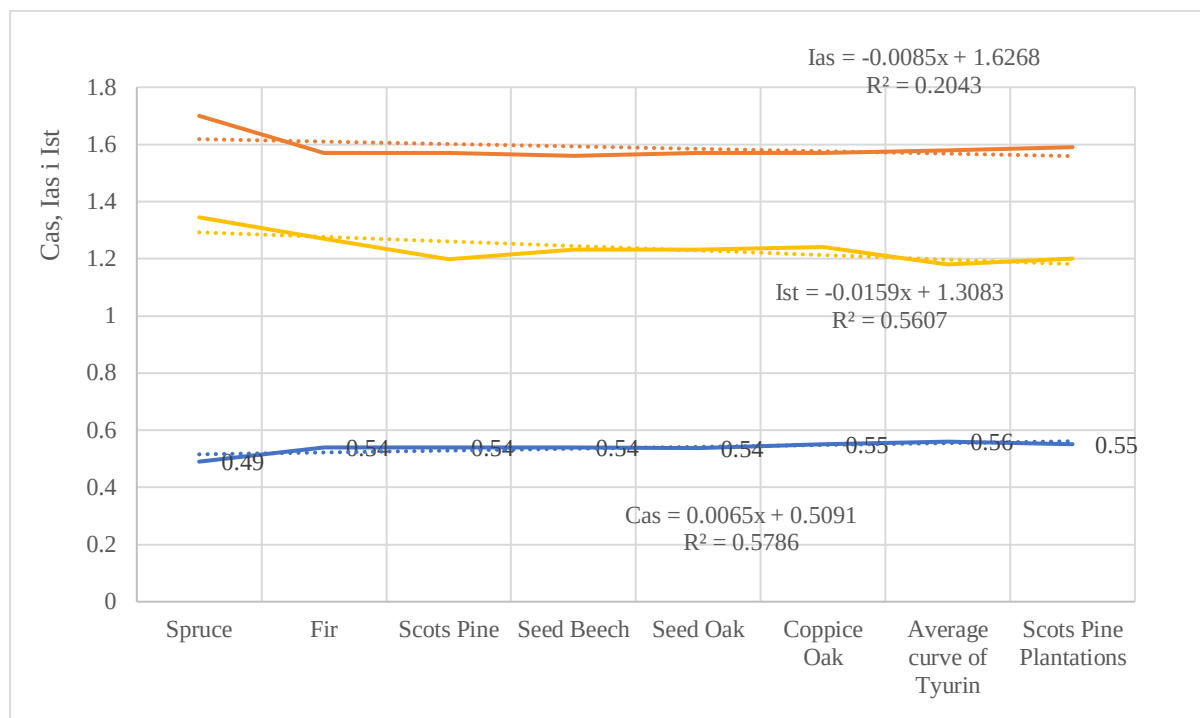


Figure 7. Coefficients (C_{as}) and indices of asymmetry (I_{as}), and indices of steepness (I_{st}) by tree species

From Fig. 7 it can be seen that the asymmetry coefficients for all tree species increase slightly, i.e. the asymmetry from spruce through the other species up to the

Conclusions

The study shows that the structural regularities of stands in terms of thickness (asymmetry of diameter distributions) are related to those in terms of height (steepness of height-diameter curves). For all studied species, distributions skewed to the right correspond to steeper height curves, which indicates higher

Average Tyurin Curve shifts to the left, and this is accompanied by a simultaneous decrease in the asymmetry indices and in the steepness indices.

productivity and better potential for wood volume. The newly applied indices – I_{as} and I_{st} – allow for an accessible and effective comparison of different types of stand structure of different tree species. The approach offers opportunities for a more accurate assessment of forest resources, and for improved decision-making in the field of silviculture.

References

1. Bronisz K., Mehtätalo L. Mixed-effects generalized height–diameter model for young silver birch stands on post-agricultural lands. *Forest Ecology and Management*. 2020; 460: 117901. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117901>.
2. Ciceu A., García-Duro J., Seceleanu I., Badea O. A generalized nonlinear mixed-effects height–diameter model for Norway spruce in mixed uneven-aged stands. *Forest Ecology and Management*. 2020; 477: 118507. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118507>.
3. Ciceu A., Pitar D., Badea O. Modeling the diameter distribution of mixed uneven-aged stands in the South Western Carpathians in Romania. *Forests*. 2021; 12(7): 958. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12070958>.
4. Ciceu A., Chakraborty D., Ledermann T. Examining the transferability of height–diameter model calibration strategies across studies. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2023; Advance online publication. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119574>.
5. Da Silva B.G., Demétrio C.G.B., Sermarini R.A., Molenberghs G., Verbeke G., Behling A., Figura M.A. Height–diameter models: A comprehensive review with new insights on relationships to generalized linear models and differential equations. *International Forestry Review*. 2024; 26(4): 398–419. – DOI: <https://doi.org/10.1505/146554824839334687>.

6. Han Y., Lei Z., Ciceu A., Zhou Y., Zhou F., Yu D. Determining an accurate and cost-effective individual height–diameter model for Mongolian pine on sandy land. *Forests*. 2021; 12(9): 1144. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091144>.
7. Lee D., Siipilehto J., Miina J., Niemistö P., Haapanen M., Hynynen J., Huuskonen S. Site index and stand characteristic models for silver birch plantations in southern and central Finland. *Forest Ecology and Management*. 2024; 563: 121998. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121998>.
8. Lebedev A.V. New generalized height–diameter models for birch stands in European Russia. *Baltic Forestry*. 2020; 26(2): 265–271. – URL: https://balticforestry.lammi.lt/bf/PDF_Articles/2020-26%5B2%5D/Baltic%20Forestry%202020.2_265-271.pdf.
9. Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Verification of two- and three-parameter simple height–diameter models for birch in the European part of Russia. *Journal of Forest Science*. 2020; 66(9): 375–382. – DOI: <https://doi.org/10.17221/76/2020-JFS>.
10. Petrin R., Markov I., Mihov I. Comparative studies on the structure of natural mature and middle-aged beech dendrocoenoses by height. *Management and Sustainable Development*. 2014; 16(49): 76–81. – URL: https://jmsd.bg/files/articles/49/49-10_R_Petrin_Markoff_Mihov.pdf (In Bulgarian).
11. Petrin R. Height structure of Scots pine stands. *Forestry ideas*. 2015; 21(2): 241–249. – URL: https://forestry-ideas.info/issues/issues_Index.php?journalFilter=69.
12. Petrin R., Markov I. Structure of spruce and fir dendrocoenoses by diameter. *Journal of Management and Sustainable Development*. 2015; 17(55): 97–102. – URL: https://jmsd.bg/files/articles/55/55-14_R_Petrin_I_Markoff.pdf (In Bulgarian).
13. Petrin R. Thickness structure of (coppice) tendril oak, winter oak and cerris oak dendrocoenoses. *Management & Sustainable development*. 2016; 18(57): 91–95. – URL: https://jmsd.bg/files/articles/57/57-16_R_Petrin.pdf.
14. Petrin R., Markoff I. Height structure of Coppice oak (Hungarian, Sessile and Turkey) stands. *Forestry ideas*. 2016; 22(2): 206–213. – URL: https://forestry-ideas.info/issues/issues_Index.php?pageNum_rsIssue=1&totalRows_rsIssue=10&journalFilter=56.
15. Petrin R. General regularities in the Height structures of Norway-spruce, Silver-fir and other dendrocoenoses. *Management & Sustainable development*. 2018; 20(69): 62–67. – URL: https://jmsd.bg/files/articles/69/69-12_R_Petrin.pdf.
16. Petrin R., Markoff I. Thickness structures of Natural and Artificial Scots pine dendrocoenoses. *Scientific researches of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series B. Natural Sciences and the Humanities*. 2018; XVIII: 51–58. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/thickness-structures-of-naturaland-artificial-scots-pine-dendrocoenoses/viewer>.
17. Petrin R. General regularities of height–diameter curves in Hungarian oak, sessile oak and Turkey-oak high forests. *Silva Balkanica*. 2020; 21(2): 71–82. – URL: <https://archive.org/details/generalregulari21petr>.
18. Petrin R. Index method and its application in studying forest stand structure and growth. *Scientific Works of the Union of Scientists in Bulgaria – Plovdiv, Series B: Natural Sciences and Humanities*. 2021; XXI: 113–125. – URL: https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2021/05/2021_estestveni_i_humanitarni_nauki_tom_XXI.pdf.
19. Petrin R. Growth-rate indices and growth type coefficients in height of broadleaved forest stands. *Forestry Engineering Journal*. 2022; 12(4): 47–59. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/366910732> (Available via ResearchGate).
20. Petrin R. Simple asymmetry indicators tested in natural even-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Bulgaria. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13(3): 41–55. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/4>.
21. Petrin R. Comparative analysis of structure by thickness and height of oak forest dendrocoenoses using new indicators in studying asymmetry. *Scientific Works of the Union of Scientists in Bulgaria – Plovdiv, Series B: Natural Sciences and Humanities*. 2023a; XXI: 126–136. – URL: https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2023/06/2023_natural_sciences_and_humanities_vol_XXIV.pdf.

22. Petrin R. Oak dendrocoenoses' thickness structures determined by means of new indicators and comparing these with the respective height structures. *Nauka za gorata (Forest Science), Special Issue.* 2024; 199–207. – URL: https://naukazagorata.com/wp-content/uploads/2024/07/21_Petrin_OK.pdf.
23. Petrin R.D. Steepness and types of steepness of structure curves according to volume of aggregates of forest stands of different categories and tree species. *Silva Balcanica.* 2024a; 25(3): 33–43. – DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.25.e129570>.
24. Petrin R. Height structure and productivity of forest stands of different tree species. In: *Proceedings of the 33rd International Scientific Conference "Management and Quality. Ecology and Management of Forest Ecosystems"*, October 9–10, 2024, Sofia. 2024; p. 132–140. – URL: <https://sskb.org/dokladi/2024/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%20%D0%9C%D0%9D%D0%9A%20%D0%95%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F2024.pdf>.
25. Nuutinen Y., Mehtätalo L. Predicting height–diameter relationship in uneven-aged stands in Finland. *Forest Ecology and Management.* 2023; 549: 121486. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121486>.

Информация об авторе

✉ *Румен Димитров Петрин* – кандидат с.-х. (доктор) наук (по болгарской номенклатуре: образовательная и научная степень «доктор»), доцент, Научно-исследовательский институт леса Болгарской академии наук, бул. Климента Охридского, 132, г. София, 1756, Болгария. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>, email: lesni4eja2014@gmail.com.

Information about the author

✉ *Rumen D. Petrin* – Dr. Sci. (Forestry), Associated Professor, Forest Research Institute in Bulgarian Academy of Sciences, 132, St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>, e-mail: lesni4eja2014@gmail.com.

✉ Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/2>

УДК 630*81:543.226:630*44(571.52)



Термогравиметрический анализ древесины кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на разных стадиях усыхания, произрастающего в Северо-Восточной Тыве

Екатерина А. Артемихина (Тютюкова)^{1,2} ✉, tyukatie@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>

Сергей В. Жила^{1,2}, getgain@mail.ru <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>

Сергей С. Кулаков², muscul-kul@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>

Денис А. Демидко^{1,2}, sawer-beetle@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>

Юрий В. Данилюк^{1,3}, ura_danilyk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>

Антонина А. Анискина¹, aniskina_a@ksc.krasn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, 660036, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, 660037, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация

³Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, 660041, пр. Свободный, 82А, Российская Федерация

Повышение температуры воздуха в результате глобального потепления, скорее всего, станет ключевым абиотическим стрессором, которому древесным растениям придется противостоять. Было проведено много исследований отдельных стрессоров, однако растения обычно страдают от сочетаний факторов стресса в естественной среде обитания. В последние годы комбинированные абиотические стрессы стали особенно серьезным последствием изменения климата. Ситуация, связанная с дефицитом влаги, которая вызвана засухой, в сочетании с повышающейся температурой воздуха были признаны одними из наиболее важных триггеров гибели деревьев во всем мире. Это исследование было первым, в котором темнохвойные насаждения кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), произрастающие в восточной части республики Тыва были изучены с помощью быстрого аналитического метода исследования – термогравиметрия. Наши результаты показывают, что самая ранняя стадия диагностирования стресса возможна на жизненном состоянии «ослабленные деревья» с дефолиацией 11–25% и незначительным изменением окраски хвои и единичными повреждениями. На данном этапе происходит снижение относительного содержания лигнина и повышение относительного содержания целлюлозы. Вышеуказанный факт открывает возможность для выявления деревьев, которые находятся в критическом состоянии. Кроме того, увеличивающееся относительное содержание лигнина и снижающееся относительное содержание целлюлозы может быть маркером для установления критической фазы. Также, одновременное снижение значений энергии активации целлюлозы маркером деградации ее структуры. Полученные выводы, подчеркивают необходимость пересмотра традиционных подходов к лесопользованию в условиях антропогенных климатических изменений и разработки новых стратегий сохранения биоразнообразия бореальных экосистем. Последовательное изучение физико-химических процессов темнохвойных насаждений имеет важное значение для внедрения своевременных мер по управлению рисками в лесном хозяйстве.

Ключевые слова: кедр сибирский, термический анализ, усыхание, климатический тренд, комбинированный стресс

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение коллективом научной лаборатории «Защита леса» проекта «Методологические основы оценки лесопатологических рисков в насаждениях юга Средней Сибири» (№ FEFE-2024-0016)

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Термогравиметрический анализ древесины кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на разных стадиях усыхания, произрастающего в Северо-Восточной Тыве / Е. А. Артемихина (Тютюкова), С. В. Жила, С. С. Кулаков, Д. А. Демидко, Ю. В. Данилюк, А. А. Анискина // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 20–36. – Библиогр.: с. 31–35 (40 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/2>.

Поступила 08.07.2025. Пересмотрена 09.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Thermogravimetric analysis of Siberian cedar wood (*Pinus sibirica* Du Tour) at different stages of dieback, growing in North-Eastern Tuva

Ekaterina A. Artemikhina (Tyutkova)^{1,2} ✉, tyukatie@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>

Sergey V. Zhila^{1,2}, getgain@mail.ru  <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>

Sergey S. Kulakov², muscul-kul@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>

Denis A. Demidko^{1,2}, sawer-beetle@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>

Yuriy V. Danilyuk^{1,3}, ura_danilyk@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>

Antonina A. Aniskina¹, aniskina_a@ksc.krasn.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>

¹ Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Svobodny Avenue, 82A, Russian Federation

Abstract

Rising air temperatures due to global warming will likely become a key abiotic stressor that woody plants will have to cope with. While numerous studies have examined individual stressors, plants typically suffer from combinations of stressors in their natural habitats. In recent years, combined abiotic stresses have become a particularly serious consequence of climate change. Drought-induced moisture deficits, coupled with rising air temperatures, have been recognized as among the most important triggers of tree mortality worldwide. This study was the first to examine dark-coniferous Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) stands in the eastern part of the Republic of Tuva using a rapid analytical method – thermogravimetry. Our results show that the earliest stage of stress diagnosis is possible in the "weakened trees" life stage, with 11-25% defoliation, minor changes in needle color, and isolated lesions. At this stage, the relative lignin content decreases and the relative cellulose content increases. This fact opens the possibility of identifying trees in critical condition. Furthermore, increasing relative lignin content and decreasing relative cellulose content can serve as a marker for determining a critical phase. Similarly, a simultaneous decrease in cellulose activation energy values is a marker of structural degradation. These findings highlight the need to reconsider traditional approaches to forest management in the face of anthropogenic climate change and develop new strategies for preserving the biodiversity of boreal ecosystems. A consistent study of the physicochemical processes in dark coniferous stands is essential for the implementation of timely risk management measures in forestry.

Keywords: *Siberian pine, thermal analysis, shrinkage, climate trend, combined stress*

Funding: was provided by the project "Methodological basis for assessment of forest pathology risks in southern Central Siberia" (№ FEFE-2024-0016) under the state order of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation for implementation by the Scientific Laboratory of Forest Health

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

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

For citation: Artemikhina (Tyutkova) E. A., Zhila S. V., Kulakov S. S., Demidko D. A., Danilyuk Yu. V., Aniskina A. A. (2026). Thermogravimetric analysis of Siberian cedar wood (*Pinus sibirica* Du Tour) at different stages of dieback, growing in North-Eastern Tuva. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 20-36 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/2>.

Received 08.07.2025.

Revised 09.02.2026.

Accepted 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Темнохвойные насаждения горных лесов Республики Тыва представляют собой уникальный объект для экологических исследований, имеющий важное значение для поддержания биологического разнообразия и устойчивости горных ландшафтов всего Алтае-Саянского экорегиона. Южная Сибирь – один из наиболее уязвимых к изменению климата регионов России, современные климатические

изменения, характеризующиеся ростом температур, изменением режима осадков и учащением экстремальных погодных явлений, оказывают значительное влияние на лесные экосистемы данного региона [1-3].

В современной лесной экологии особый научный интерес вызывают исследования горных лесных насаждений, что обусловлено их исключительной чувствительностью к глобальным климатическим трансформациям по сравнению с

равнинными аналогами [3-5]. Горные леса представляют большой интерес для анализа связи между климатом и продуктивностью данных насаждений [2]. Особую актуальность приобретают исследования горных экосистем Южной Сибири, где многочисленными авторами была установлена их исключительная восприимчивость к современным климатическим изменениям [2].

За последние несколько десятилетий в бореальных лесах Сибири рядом авторов отмечена тревожная тенденция к увеличению смертности ценозообразующих хвойных пород, в частности кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) [5-7]. Кедровые насаждения являются чутким индикатором климатических изменений на южной границе произрастания [5]. Современные научные исследования [7], убедительно доказывают, что наблюдаемая деградация данных лесных экосистем представляет собой сложный многофакторный процесс, обусловленный взаимодействием климатических и биотических факторов, где ключевыми элементами являются прогрессирующее снижение влагообеспеченности, увеличение испаряемости на фоне глобального потепления и изменение сезонного распределения осадков, что в совокупности формирует устойчивый гидротермический дисбаланс в лесных экосистемах.

В контексте глобальных климатических изменений темнохвойные насаждения Республики Тыва, расположенные в южной части горной системы Южной Сибири, представляют особый научный интерес как уникальный модельный регион [8]. Географическое положение данной территории на стыке Центрально-Азиатского и Сибирского климатических регионов, а также выраженная высотная поясность создают исключительное разнообразие природных условий на относительно компактной площади [1, 8]. Кедровые насаждения Тывы формируются в условиях ограниченного увлажнения и значительных перепадов температур, что делает их особенно чувствительными индикаторами климатических изменений [8]. Важнейшей характеристикой региона выступает его относительная экологическая сохранность - антропогенная трансформация лесных экосистем здесь значительно менее выражена по сравнению со многими другими регионами Сибири, что позволяет изучать реакции лесных экосистем на изменяющиеся климатические параметры в условиях, максимально приближенных к естественным [1].

Современные климатические изменения, характеризующиеся устойчивым повышением средних температур, оказывают существенное воздействие на функционирование лесных экосистем, данный абиотический фактор приобретает особую значимость в связи с его

прямым влиянием на ключевые физиологические и биохимические процессы [9]. Согласно современным данным, комбинированный эффект засухи и теплового стресса рассматривается как один из основных факторов, способствующих масштабной гибели древесных растений в глобальном масштабе. Важно отметить, что физиологические и биохимические реакции растений на комбинированный стресс зачастую существенно отличаются от их реакции на отдельные стрессовые воздействия [9, 10]. Это позволило исследователям выдвинуть гипотезу о том, что растения воспринимают комбинированный стресс как качественно новое стрессовое состояние.

Несмотря на то, что влияние климатического тренда на бореальные леса широко задокументировано, знания о том, как изменение климата влияет на основные полимерные компоненты клеточной стенки деревьев в процессе усыхания и, следовательно, на их жизненное состояние скудны. Исследования подобного рода предполагают использование современных высокоинформативных, точных и экспрессных методов. Этим требованиям удовлетворяют метод термического анализа (термогравиметрия – ТГ), который широко используется в древесиноведении и химии древесины при изучении свойств древесинного вещества и основных его полимерных компонентов – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина [11]. Это послужило основанием использования нами метода ТГ для оценки изменения физико-химических процессов в клеточных стенках кедра сибирского под влиянием изменяющихся условий произрастания древесной растительности. Изложенный в работе материал имеет непосредственное отношение к исследованию особенностей древостоев в процессе усыхания в условиях современного климатического тренда.

Цель нашей работы состояла в оценке причины усыхания кедровых насаждений в горных лесах Южной Сибири с применением метода термического анализа.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объектами исследования были насаждения кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), относящиеся к Тоджинскому лесничеству в северо-восточной части Республики Тыва. Пробная площадь (ПП) расположена в 14 км на северо-запад от п. Ырбан (52.814944, 95.629244) и в 148 км к северо-востоку от столицы Республики Тыва города Кызыл, в вершине ручьев Урунер, Чинге-Даг-Хем и Уза (рис. 1).



Рисунок 1. Расположение пробной площади (ПП) на карте.

Figure 1. Location of the trial plot on the map.

Источник: карты Гугл

Source: Google Maps

Рельеф горный, высота над уровнем моря 1377 метров. Растительность представлена кедровым чернично-зеленомошным лесом. Древесный ярус представлен кедром сибирским (*Pinus sibirica* Du Tour), елью сибирской (*Picea obovate* Ledeb.), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и березой повислой (*Betula pendula* Roth). Средний возраст исследуемых деревьев кедра 140 лет. Средний диаметр – 28 см., средняя высота – 23 м., полнота – 0,6, а запас – 260 м³/га.

Климат исследуемой территории резко-континентальный. В летнее время температура воздуха поднимается до +40 градусов, лето часто засушливо. Зимой температура понижается до -50 градусов, зима в основном малоснежная.

Дизайн эксперимента

Для определения жизненного состояния исследуемых насаждений на ПП проведено обследование древостоев в соответствии с общепринятыми таксационными методиками, с использованием современного оборудования [12]. Было заложено несколько круговых площадок радиусом 15 м. на которых проводились работы по учету отпада деревьев (оценено не менее 200 деревьев). Для оценки жизненного состояния деревьев *P. sibirica* использовалась стандартизированная методика визуальной оценки состояния крон, с делением на категории, разработанная в рамках Международной кооперативной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests) [13, 14]. Данная методология является общепринятым стандартом для исследований лесных экосистем в Европе и широко применяется в российских работах [15-17]. Для каждой категории состояния методом случайной стратифицированной выборки отбиралось не менее 7 модельных деревьев (рис. 2), соответствующих средним таксационным

показателям древостоя (средние диаметра на высоте 1,3 м и высота), что позволяет минимизировать влияние размерного фактора при сравнительном анализе. Согласно протоколу ICP Forests, к категории 1 (Кат. 1) (здоровые деревья) отнесены особи с дефолиацией менее 10%, нормальной зеленой окраской хвои и отсутствием видимых повреждений. Категория 2 (Кат. 2) (ослабленные деревья) включала экземпляры с дефолиацией 11-25%, незначительным изменением окраски хвои и единичными повреждениями. Категория 3 (Кат. 3) (сильно ослабленные деревья) характеризовалась дефолиацией 26–60%, выраженным изменением окраски хвои и наличием признаков заселения стволовыми вредителями. Категория 4 (Кат. 4) (усыхающие деревья) объединяла особи с дефолиацией 61–99%, преимущественно сухой или некротизированной хвоей и активным заселением ксилофагами. Категория 5 (Кат. 5) (сухостой) подразделялась на свежий сухостой текущего года (дефолиация 100%, хвоя полностью сухая, но сохраняющаяся) и старый сухостой прошлых лет (отсутствие хвои, осыпание коры, начальные стадии деструкции древесины) [14].

Кат. 1 / Cat. 1 Кат. 2 / Cat. 2 Кат. 3 / Cat. 3 Кат. 4 / Cat. 4 Кат. 5 / Cat. 5

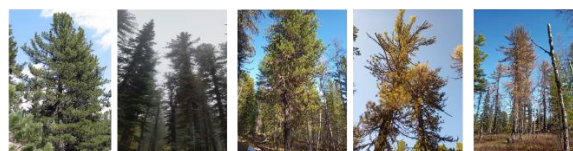


Рисунок 2. Категории жизненного состояния кедр.

Figure 2. Siberian pine tree viability classes

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

С каждой категории были выбраны по 7 деревьев, с семи деревьев были отобраны 7 сквозных кернов на высоте уровня груди (1,3 м.) Поскольку первые признаки ослабления кедр нами зафиксированы в 2017 году, то было принято решения исследовать физико-химическую характеристику древесины деревьев в период с 2017 по 2023 гг. (рис. 3.).

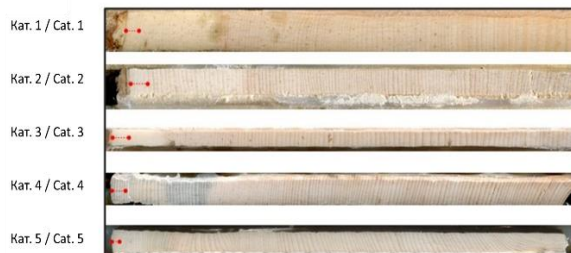


Рисунок 3. Крены кедр с деревьев различных категорий жизненного состояния.

Figure 3. Siberian pine cores from trees of various life status categories.

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Под 20-кратным увеличительным стеклом проводился отсчет нужных для исследования годичных колец, от кернов отрезался нужный временной ряд, далее часть керна с кольцами 2023-2017 гг. измельчалась в древесный порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). После кондиционирования образцов до влажности, равновесной с лабораторной влажностью воздуха ~65 %, после чего проводился термический анализ.

Термогравиметрия

С помощью термомикровесов TG209F1 Libra (Netzsch, Германия) образцы древесины анализировали в атмосфере воздуха при следующих условиях: скорость нагрева – 10 °C/мин от 25 до 700 °C, скорость потока защитного и продувочного газов – 20 мл/мин; масса образца от 2,50 до 2,99 мг, тигель корундовый цилиндрической формы. Взвешивание образцов для анализа проводили на лабораторных весах XFR-125E (Vibra, Япония). Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью пакета программ, поставляемого с прибором – «NETZSCH Proteus Thermal Analysis 4.8.4».

Анализ кинетики

Кинетические характеристики определяли, используя термогравиметрические данные, полученные при разных скоростях нагрева: 10, 20 и 40 град/мин в атмосфере азота при следующих условиях: скорость нагрева – 10, 20 и 40 °C/мин в температурной области от 25 до 700 °C, скорость потока защитного и продувочного газов – 20 мл/мин; масса образца от 2,50 до 2,99 мг, тигель корундовый цилиндрической формы. Анализ кинетических зависимостей термодеструкции древесины *A. sibirica* проводили на основе термогравиметрических данных с использованием безмодельного метода Озавы–Флинна–Уолла (ОФУ). Уравнение для расчёта энергии активации выглядит следующим образом [18]:

$$\ln(\beta) \cong \ln(AEaRf(\alpha)) - 5.3305 - 1.052 \times EaRT, (1)$$

где α – степень превращения: $\alpha = (m_0 - m) / (m_0 - m_f)$; m_0 – начальная масса образца в эксперименте ТГ; m – текущая масса образца при

температуре T ; m_f – конечная масса образца после термической деградации; β – скорость нагрева; R – газовая постоянная; A – предэкспоненциальный фактор; $F(\alpha)$ – функция математического представления кинетической модели ОФУ. Расчеты выполнены в программах Kinetics-3.

Полученные результаты ТГ/ДТГ-анализа в окислительной среде были использованы для установления относительного количества основных полимерных компонентов в древесинном веществе кедра сибирского, а результаты ТГ/ДТГ-анализа в инертной среде были использованы для расчета энергии активации пиролиза древесины кедра сибирского. Ввиду того, что пиролиз лигноцеллюлозной биомассы включает целый ряд одновременно и/или последовательно протекающих химических реакций, сопровождаемых потерей массы, основную кинетическую характеристику процесса пиролиза – энергию активации – следует рассматривать как эффективный, или кажущийся параметр. энергии активации пиролиза коры пихты.

Анализ данных

Статистическая обработка полученных результатов была произведена с помощью многомерного дисперсионного анализа MANOVA [19].

Исследование выполнено с использованием аналитической системы Термомикровесы TG 209 F1 Libra в комплексе со встроенным Фурье ИК-спектрометром Perseus на базе Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Результаты

1.1 Термогравиметрия

На рисунке 4 представлены результаты термогравиметрии образцов древесины кедра (средние значения ТГ и ДТГ данных, полученных в результате термического анализа для семи деревьев кедра из каждой категории). В таблице 1 представлены термические характеристики образцов древесины кедра.

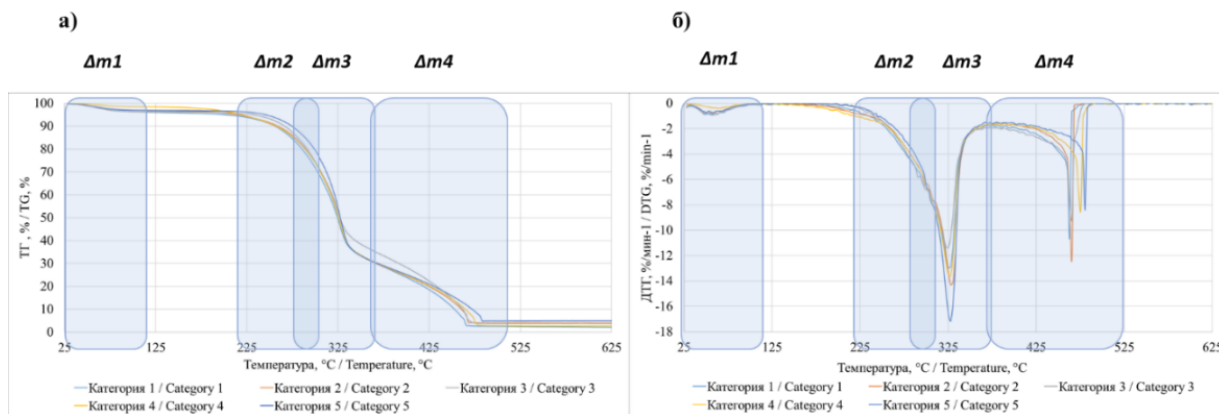


Рисунок 4. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) для окислительной термодеструкции образцов кедр.

Figure 4. TG (a) and DTG (b) curves for oxidative thermal destruction of cedar samples

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Таблица 1

Стадии термической деструкции образцов древесины кедр в окислительной атмосфере

Table 1

Stages of thermal destruction of cedar wood samples in an oxidizing atmosphere

Образец / Sample	$\Delta m1$	$\Delta m2$	$\Delta m3$	$\Delta m4$	$\Delta m3/\Delta m4$
Категория 1 / Category 1	$3,45 \pm 0,705$	$20,17 \pm 1,506$	$42,47 \pm 2,392$	$29,17 \pm 2,990$	1,45
Категория 2 / Category 2	$2,97 \pm 0,503$	$20,03 \pm 1,531$	$47,10 \pm 1,174$	$25,70 \pm 1,819$	1,83
Категория 3 / Category 3	$3,39 \pm 0,826$	$16,59 \pm 1,161$	$45,29 \pm 1,207$	$32,25 \pm 1,016$	1,40
Категория 4 / Category 4	$1,96 \pm 0,600$	$19,18 \pm 2,254$	$41,92 \pm 1,146$	$32,53 \pm 1,733$	1,28
Категория 5 / Category 5	$2,85 \pm 0,724$	$16,57 \pm 1,099$	$37,93 \pm 1,022$	$37,44 \pm 1,447$	1,01

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Потеря массы на кривых ДТГ (рис. 4 б) ниже 180 °С приписывается испарению воды ($\Delta m1$) и высвобождению летучих соединений древесины варьировалась от 1,96 до 3,45 % (табл. 1). Экстрактивные вещества древесины разрушаются при также при низкой температуре и могут оказывать влияния на термическую стабильность основных полимерных компонентов древесинного вещества и удаление экстрактивных веществ последовательно приводит к повышению термической стабильности древесины в целом [20].

В диапазоне 180-700 °С образцы древесины кедр показали три пика (плеча) на кривых ДТГ (рис. 4 б), связанных с тремя последовательными стадиями потери массы, которые представляют собой термическую деградацию основным компонентов древесины и сжигание угля [21, 22]. Анализируя кривые ТГ и ДТГ можно заметить, что термическая деградация образцов кедр полностью завершается при 500 °С для всех образцов. На рисунке 5 представлены значения основных полимерных компонентов образцов кедр в зависимости от его жизненного состояния.

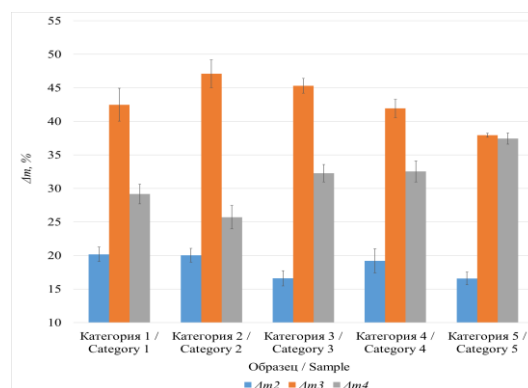


Рисунок 5. Изменение основных полимерных компонентов древесины кедр на разных стадиях жизненного состояния.

Figure 5. Changes in the main polymer components of cedar wood at different stages of life.

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Первая стадия относится к разложению или дегидратации гемицеллюлоз ($\Delta m2$) в диапазоне 180-308 °С [23] и рассматривается как плечо на ДТГ-кривых для всех образцов кедр. До ~300 °С древесина не окисляется и проявляются реакции, которые могут быть типичны для пиролиза [24]. Для всех исследованных образцов кедр термическая деструкция гемицеллюлоз было идентифицировано

как плечо в температурном диапазоне 288-308 °С. Минимальная температура термической деструкции гемицеллюлоз выявлена для образца Кат.3 (293,1 °С), а максимальная – для образцов Кат. 4 (303,7 °С) (рис. 4 б). Различия в термической стабильности гемицеллюлоз могут свидетельствовать об их неодинаковом химическом составе, который формируется в процессе жизненного состояния дерева под влиянием специфических факторов среды.

Вторую стадию принято связывать с терморазложением кристаллической формы целлюлозы и частично лигнина (Δm_3) до ~380 °С. Целлюлоза характеризуется высокой степенью упорядоченности и является термически стабильным компонентом древесины по сравнению с гемицеллюлозой. На данной стадии термической деструкции наименее стабильные алифатические группы разрушаются посредством гомолитического расщепления связей С–С и СН, что приводит к образованию высоко конденсированного и сшитого углеродистого материала [23]. Термическая деструкция целлюлозы имела форму четкого пика ДТГ (рис. 4 б) для всех образцов кедр. Минимальная температура пика ДТГ определена для образцов Кат.3 (325,7 °С), максимальная – для Кат.5 (329,1 °С). Потеря массы варьировалась от 37,9% до 47,1% (рис. 5), где образцы Кат. 2 и Кат. 3 были выше образцов Кат. 1 на 10,7 % и на 5,3 %, соответственно. Затем значение Δm_3 уменьшается по мере усыхания деревьев. Также из рисунка 4 б видны различия в максимальной скорости потери массы. Так, например, минимальное значение было выявлено для образцов Кат. 3 (-11,6 %), максимальное – для образцов Кат. 5 (-17,1%). Разная термическая стабильность образцов обусловлена увеличением индекса кристалличности и размерами кристаллитов целлюлозного комплекса. Известно, что молекулы целлюлозы представлены длинными гликозидными участками, которые способствуют увеличению термической стабильности древесины. То есть чем больше размер кристаллитов целлюлозы, тем выше термическая стабильность образца древесины [25, 26]. Таким образом, установлено, что наибольшей термической стабильностью обладает образец Кат. 3 (330 °С), а минимальной – Кат. 5 (325 °С). Образцы Кат. 3 выявил самую медленную скорость разложения целлюлозного комплекса из всех исследованных образцов древесины. На термическую стабильность целлюлозы также могут оказывать влияние экстрактивные вещества. Выявлено, что чем выше их содержание, тем медленнее происходит процесс

деградации древесины [27], что согласуется с данными, полученными для образцов Кат. 3.

Третья стадия обусловлена преобладающим термохимическим процессом, связанным с разложением и превращением лигнина (Δm_4) и окислением ранее образованного угля [28]. Механизм термической деструкции лигнина изучен недостаточно полно. Вследствие сложности химического строения и многообразия связей в структуре лигнина, при его термической деструкции протекает множество различных реакций. Сначала осуществляются реакции разрыва более слабых связей, а при более высокой температуре – и более прочных, деструктирующихся уже по другому механизму. Термическое разложение лигнина начинается при довольно низких температурах. Лигнин является достаточно термостабильным высокомолекулярным компонентом древесины, что обусловлено его ароматической природой [29]. Самое высокое значение Δm_4 выявлено у Кат. 5, а минимально – у Кат. 1. Также, замечена тенденция на повышение Δm_4 в зависимости от жизненного состояния деревьев (рис. 5). Образцы Кат. 2 выявили небольшое снижение значения Δm_4 по сравнению с Кат. 1 на 11,5 %, но в последствии Δm_4 повышается. Пиковые температуры были максимальны для Кат. 4 (475,3 °С) и для Кат. 5 (480,5 °С) (рис. 4 б), что указывает на высокую термическую стабильность лигнина о образцах Кат. 4. Остальные образцы выявили достаточно равные значения температуры при ~465 °С (рис. 5 б). Также, выявлено, что образцы Кат. 4 и Кат. 5 имели высокие значения по скорости потери массы по сравнению с образцами Кат. 1-Кат. 3, что указывает на быструю скорость разложения именно термостабильного лигнина образцов Кат. 4 и Кат. 5. Отношение целлюлозы к лигнину ($\Delta m_3/\Delta m_4$) (табл. 1) обеспечивает надежную интерпретацию полученных данных является убедительным параметром для определения степени деградации древесины. Расчеты показали, что $\Delta m_3/\Delta m_4$ снижается по мере усыхания исследуемых образцов кедр (за исключением образцов Кат. 2), что по нашему мнению указывает на изменения в лигно-углеводном комплексе в образцах Кат. 3-Кат. 5 вследствие влияния климатического тренда.

В таблице 2 представлена матрица попарных различий компонентного состава древесины кедр сибирского между группами (p -value<0,05 после fdr-коррекции) на разной стадии усыхания. В таблице 3 показаны средние значения Δm в древесине кедр сибирского для исследуемых образцов.

Таблица 2

Матрица попарных различий компонентного состава древесины кедра сибирского между группами (p-value<0,05 после fdr-коррекции) на разной стадии усыхания

Table 2

Matrix of pairwise differences in the component composition of Siberian cedar wood between groups (p-value < 0.05 after fdr-correction) at different stages of dieback

Образец / Sample	Категория 1 / Category 1	Категория 2 / Category 2	Категория 3 / Category 3	Категория 4 / Category 4	Категория 5 / Category 5
Категория 1 / Category 1	-	0,11	0,07	0,01	0,01
Категория 2 / Category 2	-	-	0,01	0,01	0,01
Категория 3 / Category 3	-	-	-	0,01	0,05
Категория 4 / Category 4	-	-	-	-	0,01
Категория 5 / Category 5	-	-	-	-	-

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Таблица 3

Средние значения Δm в древесине кедра сибирского для контрольной и опытных групп

Table 3

Average values of Δm in Siberian cedar wood for the control and experimental groups

Образец / Sample	$\Delta m, 1$ %	$\Delta m, 2$ %	$\Delta m, 3$ %	$\Delta m, 4$ %
Категория 1 / Category 1	3,6%	21,2%	44,6%	30,7%
Категория 2 / Category 2	3,1%	20,9%	49,2%	26,8%
Категория 3 / Category 3	3,5%	17,0%	46,5%	33,0%
Категория 4 / Category 4	2,1%	20,0%	43,8%	34,1%
Категория 5 / Category 5	3,0%	17,5%	40,0%	39,5%

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Из таблицы 2 и таблицы 3 видно, что MANOVA выявила значимые различия в химическом составе древесины между группами (p<0.05). Попарные сравнения с коррекцией fdr показали, что Кат. 4 и Кат. 5 значимо отличаются от контроля и между собой, тогда как группы Кат. 2 и Кат. 3 статистически не отличались от контроля по многомерному критерию. Анализ компонентного состава выявил, что в Кат. 2 наблюдалось повышение доли целлюлозы и снижение лигнина, что может отражать раннюю стрессовую реакцию укрепления клеточных стенок; в группе Кат. 3 зафиксировано снижение гемицеллюлоз и рост лигнина, характерные для переходной фазы; в группах Кат. 4 и Кат. 5 изменения соответствовали прогрессирующей деградации с падением целлюлозы и накоплением лигнина.

1.2 Анализ кинетики

Важным элементов количественной оценки результатов термогравиметрии для выявления различий физико-химических свойств между образцами является анализ кинетики процессов, которые регистрируются в процессе термической деструкции. Метод Озавы-Флинна-Уолла позволяет связать макрокинетические параметры процесса (энергию активации) с изменениями в химическом составе и надмолекулярной структуре древесины, вызванными деградацией [30]. Графическая интерпретация кинетического анализа образцов кедр сибирского методом ОФУ представлена на рисунке 6. Кинетические параметры пиролиза образцов кедр сибирского, полученные методом представлены в таблице 4

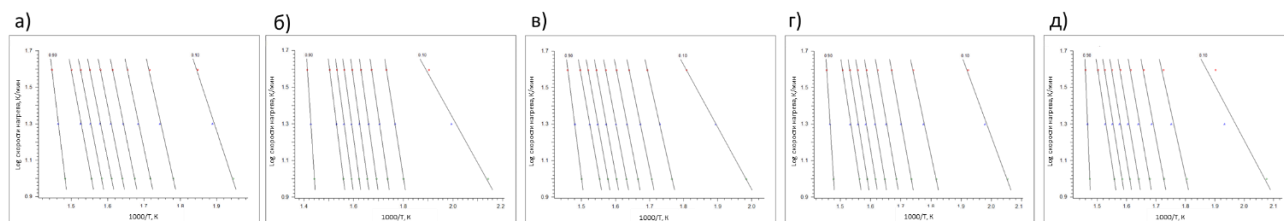


Рисунок 6. Линеаризация кинетического анализа методом ОФУ образцов кедр сибирского для категории 1 (а), категории 2 (б), категории 3 (в), категории 4 (г), категории 5 (д)

Figure 6. Linearization of kinetic analysis by the Ozawa–Flynn–Wall method of Siberian cedar samples for category 1 (a), category 2 (b), category 3 (c), category 4 (d), category 5 (e)

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Таблица 4

Кинетические параметры пиролиза образцов кедр сибирского, полученные методом ОФУ

Table 4

Kinetic parameters of pyrolysis of Siberian cedar samples obtained by the OFW method

α	Категория 1 / Category 1	Категория 2 / Category 2	Категория 3 / Category 3	Категория 4 / Category 4	Категория 5 / Category 5
0,1	108,68±2,642	39,05±2,831	57,98±4,578	79,17±5,014	47,057±4,107
0,2	163,41±5,722	156,61±4,693	150,98±6,051	139,21±3,268	127,52±4,725
0,3	171,92±2,534	167,12±7,723	163,85±6,181	167,95±1,697	152,65±4,356
0,4	181,55±3,778	173,37±3,342	171,62±5,956	169,51±2,897	161,58±5,551
0,5	181,65±4,075	176,01±5,333	178,27±4,892	173,45±4,981	172,95±2,724
0,6	180,9±5,052	179,54±3,074	178,95±3,768	173,61±2,682	172,51±5,283
0,7	186,08±3,714	186,47±2,512	181,28±3,068	180,45±4,711	183,32±2,336
0,8	194,32±2,294	195,62±3,075	187,84±5,138	194,95±1,935	193,58±3,236
0,9	310,32±7,479	405,31±6,965	279,42±8,079	485,02±6,659	763,35±8,385

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Графические выражения уравнения (1) показаны набором изоконверсионных линий (рис. 6), соединяющих точки с одинаковой степенью конверсии при разных скоростях нагрева. Определение энергии активации проведено с помощью метода наименьших квадратов и аппроксимирования зависимости $\ln\beta$ от $1/T$ к виду линейной функции и исходя из ее наклона. Энергию активации при степенях конверсии 0,1 и 0,9 следует считать экстремальной, ее значения соответствуют разным стадиям пиролиза: начальной (стадии потери влаги) и конечной (образованию коксового остатка в конце пиролиза биомассы) [31]. Изоконверсионные линии на графике метода ОФУ (рис. 6) характеризуются разными наклонами, что дает возможность объединить их в три группы аналогично результатам ТГ/ДТГ-анализа.

На основании данных таблицы 4 нами была построена зависимость значений энергии активации от жизненного состояния деревьев кедр сибирского (рис. 7). При расчете средних величин энергии активации не учитывались крайние значения α (0,1 и 0,9).

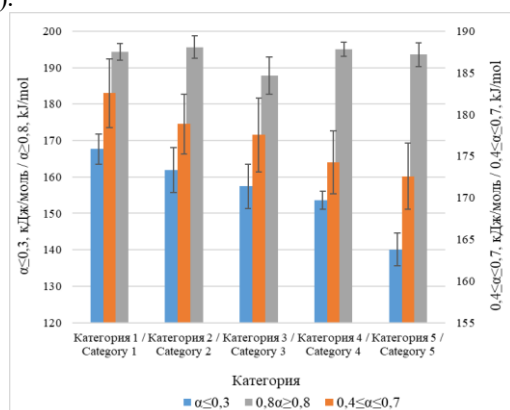


Рисунок 7. Зависимость значений энергии активации от жизненного состояния деревьев кедр.

Figure 7. Dependence of activation energy values on the vital state of cedar trees

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Значения энергии активации, рассчитанные методом ОФУ, различаются в зависимости от степени конверсии, что указывает на существование сложного механизма термической деструкции образцов кедр сибирского, происходящих в твердой фазе [28]. Выделяются три интервала: в первом ($0,1 \leq \alpha \leq 0,3$) энергия активации увеличивается и, здесь, главным образом происходит разложение гемицеллюлоз и аморфной целлюлозы. Средние значения энергии активации термической деструкции гемицеллюлоз и аморфной целлюлозы плавно снижались по мере ослабления деревьев кедр сибирского, с которых были отобраны образцы для анализа. Так, разница между образцами Кат. 1 и Кат. 2 составила 15,9 % (рис. 7) В интервале $0,4 \leq \alpha \leq 0,7$ деструкции подвергается целлюлоза. В данном интервале мы наблюдали такое же плавное снижение значений энергии активации целлюлозы в процессе ослабления деревьев кедр. Образцы Кат. 5 выявили значения энергии активации на 5,5 % ниже таковых в образцах Кат. 1 (рис. 7). На конечной стадии пиролиза образцов кедр сибирского ($\alpha \geq 0,8$) наблюдается резкое увеличение значений энергии активации. При температурах свыше 500°C процесс деструкции лигнина включает как фрагментацию внутримолекулярных связей, так и образование мономерных продуктов распада (фенолов и их производных). Пиролитическая деградация лигнина при температурах выше 600-700°C сопровождается разложением некоторых ароматических соединений и формированием структуры угля [32]. Тенденции изменения значений энергии активации в данном диапазоне нами обнаружено не было.

В таблице 5 представлены результаты попарных сравнений энергии активации, методом Озавы-Флинна-Уолла, для исследованных образцов кедр сибирского (перестановочный t-test, 5000 перестановок, fdr-коррекция).

Таблица 5

Результаты попарных сравнений энергии активации, рассчитанной методом Озавы-Флинна-Уолла, для групп с разной степенью повреждения кроны (перестановочный t-test, 5000 перестановок, fdr-коррекция)

Table 5

Results of pairwise comparisons of activation energy calculated by the Ozawa-Flynn-Wall method for groups with different degrees of crown damage (permutation t-test, 5000 permutations, fdr correction)

	Кат. 1 / Cat. 1	Кат. 2 / Cat. 2	Кат. 3 / Cat. 3	Кат. 4 / Cat. 4	Кат. 5 / Cat. 5
$0,1 \leq \alpha \leq 0,3$					
Кат. 1 / Cat. 1	-	0,076	0,029	0,029	0,029
Кат. 2 / Cat. 2	-	-	0,086	0,029	0,029
Кат. 3 / Cat. 3	-	-	-	0,217	0,029
Кат. 4 / Cat. 4	-	-	-	-	0,029
Кат. 5 / Cat. 5	-	-	-	-	-
$0,4 \leq \alpha \leq 0,7$					
Кат. 1 / Cat. 1	-	0,042	0,031	0,031	0,031
Кат. 2 / Cat. 2	-	-	0,199	0,031	0,031
Кат. 3 / Cat. 3	-	-	-	0,031	0,042
Кат. 4 / Cat. 4	-	-	-	-	0,042
Кат. 5 / Cat. 5	-	-	-	-	-
$\alpha \geq 0,8$					
Кат. 1 / Cat. 1	-	0,573	0,096	0,573	0,684
Кат. 2 / Cat. 2	-	-	0,065	0,755	0,557
Кат. 3 / Cat. 3	-	-	-	0,065	0,065
Кат. 4 / Cat. 4	-	-	-	-	0,497
Кат. 5 / Cat. 5	-	-	-	-	-

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Из таблицы 5 видно, что значения энергии активации в интервале $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$ начинают снижаться в образцах Кат. 3 и достигают минимальных значений в образцах Кат. 3 и Кат. 4. Энергия активации интервала $0,4 \leq \alpha \leq 0,7$ выявила изменения в образцах Кат. 2. В свою очередь, значения энергии активации интервала $\alpha \geq 0,8$ не меняются в процессе усыхания кедра.

Обсуждение

В контексте глобального потепления повышение температуры вероятно станет ключевым абиотическим стрессом, к которому растениям придется приспособиться. Не смотря на обширные исследования, проведенные по отдельным стрессам, растения в природе подвергаются комбинации стрессоров. Это явление стало более выраженным в последние годы из-за усиливающихся последствий климата. Таким образом, стресс от засухи в сочетании с тепловым стрессом был определен как важный триггер всемирной гибели деревьев в контексте климатического тренда [9]. Физиологическая и биохимическая реакция растения на комбинированный стресс в значительной степени отличается часто от реакции при отдельных стрессах. Поэтому было высказано предположение, что растения воспринимают комбинированный стресс как новое стрессовое состояние [33]. В условиях двойного стресса

эффективность фотосинтеза снижается, что в свою очередь сокращает жизненный цикл растений и снижает их производительность. Хорошо известно, что фотосинтез является одним из наиболее чувствительных к комбинированному стрессу физиологических процессов, и его последствия приводят к дисбалансу клеточной энергии [9, 10]. Разумно полагать, что биосинтез целлюлозы должен реагировать на фотосинтетические колебания, вызывая изменения в доступности некоторых предшественников, необходимых для биосинтеза целлюлозы. В настоящее время есть исследования, описывающие связь между влиянием фотосинтеза и модуляцией клеточной стенки. Недавно было показано, что фотосинтетическая активность является основным регулятором синтеза и отложения целлюлозы [34].

Комбинированный стресс приводит к снижению кристаллической целлюлозы [35], что подразумевает обратную зависимость между скоростью синтеза целлюлозы и ее кристалличностью. В исследованных нами образцах было выявлено повышенные значения показателя, соответствующего содержанию целлюлозы ($\Delta m3$) и снижение такового для лигнина ($\Delta m4$) в образцах Кат. 2 (рис. 6). В тоже время, в образцах Кат. 3 выявлено повышение значения $\Delta m4$ и небольшое снижение $\Delta m3$. Данный факт, по нашему мнению, может быть связан с процессами, с помощью

которых происходит замедление лигнификации в образцах Кат. 2, что обусловлено ответом на комбинированный стресс [36], а повышенное значение Δm_3 может быть связано с запасанием сахаров с целью синтеза целлюлозы на начальном этапе стресса у дерева. В условиях комбинированного стресса повышенный синтез целлюлозы может быть средством, с помощью которого поддерживается целостность клеточной стенки и давления тургора клеток, что позволяет обеспечить непрерывный рост при недостатках влаги [35]. В деревьях Кат. 3 увеличение показателя Δm_4 и повышенное по сравнению с контрольными образцами (Кат. 1) Δm_3 (рис. 6) может быть связано с увеличивающимся синтезом лигнина в клеточных стенках продолжающимися процессами запасанием сахаров. В случае с деревьями Кат. 4 и Кат. 5, был выявлен эффект, связанный с продолжающимся ростом Δm_4 и одновременным снижением Δm_3 в процессе усыхания деревьев кедров, что прекращением синтеза целлюлозы, снижением фотосинтетической активности и истощением запасов углеводов, и пассивным накоплением лигнина [37]. Содержание лигнина в кедров увеличивается в процессе их роста под действием тепла и дефицита влаги. Как фенольный биополимер, лигнин является одним из важных продуктов пути биосинтеза фенилпропаноидов растений в сосудистых растениях. При комбинированном стрессе деревья растут ненормально и сопровождаются физиологическими изменениями. Такой стресс может значительно изменить содержание лигнина или повлиять на его состав и структурную перестройку [38]. Содержание гемицеллюлоз в процессе усыхания деревьев практически не меняется. Возможно, этот факт связан со способностью гемицеллюлоз связывать целлюлозу в ее более аморфное состояние, что является адаптивным механизмом регуляции развития клеточной стенки в результате комбинированного стресса [35].

В свою очередь, падение значений энергии активации в участках, которые относятся к аморфной целлюлозе и к кристаллической ее части (рис. 7) может быть связано с деструктивными процессами в ее структурах в процессе усыхания деревьев. Аморфные участки целлюлозы являются не неупорядоченными областями в макромолекулярной цепи полисахарида, чередующиеся с кристаллическими участками [39], возможно, в результате влияния комбинированного стресса разрушаются быстрее, в следствии чего, меньше энергии нужно для их дальнейшей деструкции. Следовательно, энергия активации аморфной структуры снижается быстро. Кристаллическая структура целлюлозы является высокоупорядоченной надмолекулярной системой и

прочнее аморфной части. По нашему мнению, под действием стресса, в кристаллической структуре нарушается упорядоченность, что облегчает термическое разложение даже кристаллических областей. Значения энергии активации лигнина практически не меняется в процессе усыхания деревьев кедров (рис. 7). Так как лигнин разлагается в широком диапазоне температур (200-900°C), и его пиролиз идет медленно [40], следовательно, расчет энергии активации менее точный и менее чувствительный к небольшим изменениям.

Выводы

Впервые жизненное состояние темнохвойных насаждений на примере кедров сибирского, произрастающей на Юге Сибири было изучено с помощью точного экспрессного аналитического метода исследования – термогравиметрия. Примененный метод позволил выявить динамику изменения физико-химических характеристик клеточной стенки у кедров сибирского под воздействием биотического стресса. Полученные данные согласуются с гипотезой о ведущей роли комбинированного стресса рост и продуктивность деревьев. Наши результаты показывают, что самая ранняя стадия диагностирования стресса возможна на жизненном состоянии «ослабленные деревья» с дефолиацией 11–25% и незначительным изменением окраски хвои и единичными повреждениями. На данном этапе происходит снижение относительного содержания лигнина и повышение относительного содержания целлюлозы. Вышеуказанный факт открывает возможность для выявления деревьев, которые находятся в критическом состоянии. Кроме того, увеличивающееся относительное содержание лигнина и снижающееся относительное содержание целлюлозы может быть маркером для установления критической фазы. Также, одновременное снижение значений энергии активации целлюлозы маркером деградации ее структуры.

Риск усыхания кедровых насаждения на территории Тоджинского лесничества в северо-восточной части Республики Тыва Южной Сибири подчеркивает настоятельную необходимость в крупномасштабном и пространственно-точном мониторинге для выявления быстро меняющихся изменений в темнохвойных насаждениях. Изменение климата влечет за собой усыхание деревьев, следовательно, увеличивается риск пожаров, которые приводят к ослаблению древостоев, снижению продуктивности и возможности атак вредителями и патогенами.

Проблема усыхания кедров сибирского приобретает особую актуальность в системе лесного хозяйства ввиду существующего правового режима его эксплуатации. Согласно действующему лесному законодательству, рубки жизнеспособных кедровых

насаждений находятся под полным запретом, за исключением случаев санитарных мероприятий в усыхающих древостоях, где допускаются исключительно выборочные рубки ограниченной интенсивности. Поэтому последовательное изучение физико-химических процессов

темнохвойных насаждений имеет важное значение для внедрения своевременных мер по управлению рисками в лесном хозяйстве.

Список литературы

1. Куулар Х.Б. Состояние и динамика границ кедровых лесов хребта Западный Танну-Ола в Республике Тыва. Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2023. – Т. 78. – № 4. – С. 40-50. – DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4>.
2. Кошкарлов А.Д., Кошкарлова В.Л., Назимова Д.И. Многовековые климатические тенденции трансформации кедровых лесов разных лесорастительных зон Западного Саяна // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 2. – С. 3-16. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210201>.
3. Kharuk, V.I., Im, S.T., Petrov, I.A., Shushpanov, A.S., Dvinskaya, M.L. Climate-Induced Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) Mortality in the Siberian Mountains. In: Schieckhoff, U., Singh, R., Mal, S. (eds) Mountain Landscapes in Transition. Sustainable Development Goals Series. 2022; 403-416. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16.
4. Kharuk, V.I., Im S.T., Petrov I.A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: Vegetation response to warming. Journal of Mountain Science. 2021; 18 (12): 3099-3108. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6876-2>.
5. Kharuk V.I., Petrov I.A., Golyukov A.S., Im S.T., Shushpanov A.S. Mountain taiga in a warming climate: contrast of Siberian pine growth along an elevation gradient. Forests. 2024; 15 (1): 50. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15010050>.
6. Шишикин А.С., Мурзакматов Р.Т., Брюханов И.И. Восстановление усыхающих горных кедровников юга Сибири. Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 5. – С. 70–78. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240507>.
7. Petrov I.A., Kharuk V.I., Golyukov A.S., Im S.T., Ondar S.O., Shushpanov A.S. Siberian pine and larch response to warming-drying climate in the Southern boundary of their range. Forests. 2024; 15 (6): 1054. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061054>.
8. Makunina N.I., Egorova A.V., Pisarenko O.Y. Drawing of potential areas of plant communities for geobotanical zoning purposes (on example of Tuva forests). Contemporary Problems of Ecology. 2020; 13: 412-417. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425520040095>.
9. Dias M.C., De Oliveira J.M.F., Marum L., Pereira V., Almeida T., Nunes S., Araújo M., Pereira J.M.M., Correia C., Santos C. *Pinus elliottii* and *P. Elliottii* x *P. Caribaea* hybrid differently cope with combined drought and heat episodes Industrial Crops and Products. 2022; 176: 114428. – DOI: <http://10.1016/j.indcrop.2021.114428>.
10. Gong X.W., Hao G.Y. The synergistic effect of hydraulic and thermal impairments accounts for the severe crown damage in *Fraxinus mandshurica* seedlings following the combined drought-heatwave stress. Science of The Total Environment. 2023; 856 (1): 159017. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159017>.
11. Paredes R., Castells B., Tascón A. Thermogravimetric assessment of biomass: unravelling kinetic, chemical composition and combustion profiles. Fire. 2024; 7(11): 396. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7110396>.
12. Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Нагимов В.З., Артемьева И.Н. Лесотаксационные измерения. Учебное пособие. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2021; 95.
13. Schwärzel K., Seidl W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. Strategy and Implementation of ICP Forests. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, 2022; 12.
14. Eichhorn J., Roskams P., Potocic N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletkovic I., Schroeck H-W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. (ed.). Hamburg: Thünen Institute of Forest Ecosystems, 2020; 49.
15. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforhin I., Chernikhovsky D., Chernov I. Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507(1): 012001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012001>.
16. Narykova A.N., Plotnikova A.S., Akhmetova G.V., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. Geospatial modeling of carbon stocks in forest litter in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus (Leningrad Oblast). Eurasian Soil Science. 2025; 58: 131. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600484>.

17. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Dmitrieva A.A. Pine needles and soil as bioindicators of forest ecosystems in the anthropogenically disturbed areas of the Baikal region. *BIO Web of Conferences*. 2024; 93: 01003. – DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301003>.
18. Fischer, O., Lemaire, R. & Bensakhria, A. Thermogravimetric analysis and kinetic modeling of the pyrolysis of different biomass types by means of model-fitting, model-free and network modeling approaches. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024; 149: 10941-10963. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12868-w>.
19. Lu M., Zhou B. A one-way MANOVA test for high-dimensional data using clustering subspaces. *Statistics & Probability Letters*. 2025; 217: 110293. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2024.110293>.
20. Albert, C.M., Liew, K.C. A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood. *Wood Science and Technology*. 2025; 59: 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01665-3>.
21. Barzegar R., Yozgatligil A., Olgun H., Atimtay A.T. TGA and kinetic study of different torrefaction conditions of wood biomass under air and oxy-fuel combustion atmospheres. *Journal of the Energy Institute*. 2020; 93(3): 889-898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.001>.
22. Czajkowski L., Olek W., Weres J. Effects of heat treatment on thermal properties of European Beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020; 78(3): 425-431. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01525-w>.
23. Fraga L.G., Silva J., Teixeira S., Soares D., Ferreira M., Teixeira J. Influence of operating conditions on the thermal behavior and kinetics of pine wood particles using thermogravimetric analysis. *Energies (Basel)*. 2020; 13(11). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112756>.
24. Hill C., Altgen M., Rautkari L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*. 2021; 56(11): 6581-6614. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.
25. Nurazzi N.M., Asyraf M.R.M., Rayung M., Norrahim M.N.F., Shazleen S.S., Rani M.S.A., Shafi A.R., Aisyah H.A., Radzi M.H.M., Sabaruddin F.A., Ilyas R.A., Zainudin E.S., Abdan K. Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments. *Polymers (Basel)*. 2021; 13(16): 2756. –DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162710>.
26. Shapchenkova O., Loskutov S., Aniskina A., Börsök Z., Pásztor Z. Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022; 80(2): 409-417. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01763-6>.
27. Keržič E., Vek V., Oven P., Humar M. Changes in wood durability due to leaching of biologically active substances (extractives) resulting from weathering. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03921. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03921>.
28. Фетисова О.Ю., Микова Н.М., Таран О.П. Оценка применимости модельных и безмодельных методов кинетического анализа неізотермического пиролиза коры пихты. *Кинетика и катализ*. 2020; 6: 804-811.
29. Riaz S., Oluwoye I., Al-Abdeli Y.M. Oxidative torrefaction of densified woody biomass: Performance, combustion kinetics and thermodynamics. *Renewable Energy*. 2022; 199: 908-918. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.023>.
30. Koga N., Vyazovkin S., Burnham A.K., Favregeon L., Muravyev N., Pérez-Maqueda L.A., Saggese C., Sánchez-Jiménez P.E. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics. *Thermochimica Acta*. 2023; 719: 179384. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179384>.
31. Elkhailifa S., Mariyam S., Mackey H.R., Al-Ansari T., McKay G., Parthasarathy P. Pyrolysis valorization of vegetable wastes: thermal, kinetic, thermodynamics, and Pyrogas analyses. *Energies (Basel)*. 2022; 15(17): 6277. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176277>.
32. Lu X., Gu X. A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2022; 15(1): 106. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0>.
33. Hwang Y.B., Park K.S., Yoo S.Y., Kim T.W. Interplay of stress responses in pear tree revealed by chlorophyll fluorescence under combined *Erwinia amylovora* infection and temperature stress. *Horticulturae*. 2025; 11(11): 1358. – DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111358>.
34. Maleki S.S., Mohammadi K., Movahedi A., Wu F. and Ji K.S. Increase in cell wall thickening and biomass production by overexpression of *PmCesA2* in poplar. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 110. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00110>.
35. Han Y., Yang Y., Luo H., Cui J., Kuang B., Zhang X., Sun J., Xu J.W., Liu F. Water stress reduces cellulose deposition in the cell wall and increases wax content, resulting in decreased fiber quality. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 1(16): 1611390. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1611390>.

36. Han X., Zhao Y., Chen Y., Xu J., Jiang C., Wang X., Zhuo R., Lu M.Z., Zhang J. Lignin biosynthesis and accumulation in response to abiotic stresses in woody plants. *Forestry Research*. 2022; 12(2): 9. – DOI: <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0009>.
37. Spies P.A., Keplinger T., Horbelt N., Reppe F., Scoppola E., Eder M., Fratzl P., Burgert I., Rüggeberg M. Cellulose lattice strains and stress transfer in native and delignified wood. *Carbohydrate Polymers*. 2022; 15(296): 119922. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119922>.
38. Hang J., Tuskan G.A., Tschaplinski T.J., Muchero W., Chen J. Transcriptional and post-transcriptional regulation of lignin biosynthesis pathway genes in *Populus*. *Frontiers in Plant Science*. 2020; (11): 652. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00652>.
39. Ren W., Guo F., Zhu J. A comparative study on the crystalline structure of cellulose isolated from bamboo fibers and parenchyma cells. *Cellulose*. 2021; 28: 5993-6005. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03892-w>.
40. Jalilian M., He Q., Hu Y. Thermal Characterizations of Lignin. In: Jawaid, M., Ahmad, A., Meraj, A. (eds.). Singapore: Springer, Singapore, 2025; 375-394. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0_16.

References

1. Kuular Kh.B. *Sostoyanie i dinamika granic kedrovyyh lesov hrebta Zapadnyj Tannu-Ola v Respublike Tyva*. [The state and dynamics of the borders of cedar forests at the Western Tannu-Ola Range in the Tyva Republic]. In: Lomonosov Geography Journal. 2023; 4: 40-50. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4>.
2. Koshkarov A.D., Koshkarova V.L., Nazimova D.I. *Mnogovekovye klimaticheskie tendencii transformacii kedrovyyh lesov raznyh lesorastitel'nyh zon Zapadnogo Sayana*. [Centuries-old climatic trends of transformation of the Siberian stone pine forests in different forest vegetation zones of the Western Sayan Mountains]. In: *Siberian Forestry Journal*, 2021; 2: 3-16. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210201>.
3. Kharuk, V.I., Im, S.T., Petrov, I.A., Shushpanov, A.S., Dvinskaya, M.L. *Climate-Induced Fir (Abies sibirica Ledeb.) Mortality in the Siberian Mountains*. In: Schickhoff, U., Singh, R., Mal, S. (eds) *Mountain Landscapes in Transition*. Sustainable Development Goals Series. 2022; 403-416. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16.
4. Kharuk, V.I., Im S.T., Petrov I.A. *Alpine ecotone in the Siberian Mountains: Vegetation response to warming*. *Journal of Mountain Science*. 2021; 18 (12): 3099-3108. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6876-2>.
5. Kharuk V.I., Petrov I.A., Golyukov A.S., Im S.T., Shushpanov A.S. *Mountain taiga in a warming climate: contrast of Siberian pine growth along an elevation gradient*. *Forests*. 2024; 15 (1): 50. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15010050>.
6. Shishikin A.S., Murzakmatov R.T., Bryukhanov I.I. *Vosstanovlenie ushyayushih gornyyh kedrovnikov yuga Sibiri*. [Restoration of drying mountain cedar forests in southern Siberia]. In: *Siberian Forestry Journal*, 2024; 5: 70-78. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240507>.
7. Petrov I.A., Kharuk V.I., Golyukov A.S., Im S.T., Ondar S.O., Shushpanov A.S. *Siberian pine and larch response to warming-drying climate in the Southern boundary of their range*. *Forests*. 2024; 15 (6): 1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061054>.
8. Makunina N.I., Egorova A.V., Pisarenko O.Y. *Drawing of potential areas of plant communities for geobotanical zoning purposes (on example of Tuva forests)*. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020; 13: 412-417. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425520040095>.
9. Dias M.C., De Oliveira J.M.F., Marum L., Pereira V., Almeida T., Nunes S., Araújo M., Pereira J.M.M., Correia C., Santos C. *Pinus elliottii and P. elliottii x P. caribaea hybrid differently cope with combined drought and heat episodes*. *Industrial Crops and Products*. 2022; 176: 114428. DOI: <http://10.1016/j.indcrop.2021.114428>.
10. Gong X.W., Hao G.Y. *The synergistic effect of hydraulic and thermal impairments accounts for the severe crown damage in Fraxinus mandshurica seedlings following the combined drought-heatwave stress*. *Science of The Total Environment*. 2023; 856 (1): 159017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159017>.
11. Paredes R., Castells B., Tascón A. *Thermogravimetric assessment of biomass: unravelling kinetic, chemical composition and combustion profiles*. *Fire*. 2024; 7(11): 396. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7110396>.
12. Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Nagimov V.Z., Artemyeva I.N. *Lesotaksacionnye izmereniya. Uchebnoe posobie* [Forest Inventory Measurements. Tutorial]. 2021; 95 (In Russ.).
13. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. *Strategy and Implementation of ICP Forests*. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, 2022; 12.
14. Eichhorn J., Roskams P., Potocic N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletkovic I., Schroeck H-W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. *Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents*. (ed.). Hamburg: Thünen Institute of Forest Ecosystems, 2020; 49.
15. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforhin I., Chernikhovsky D., Chernov I. *Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS*.

- technologies*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507(1): 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012001>.
16. Narykova A.N., Plotnikova A.S., Akhmetova G.V., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. *Geospatial modeling of carbon stocks in forest litter in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus (Leningrad Oblast)*. Eurasian Soil Science. 2025; 58: 131. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600484>.
17. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Dmitrieva A.A. *Pine needles and soil as bioindicators of forest ecosystems in the anthropogenically disturbed areas of the Baikal region*. BIO Web of Conferences. 2024; 93: 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301003>.
18. Fischer, O., Lemaire, R. & Bensakhria, A. *Thermogravimetric analysis and kinetic modeling of the pyrolysis of different biomass types by means of model-fitting, model-free and network modeling approaches*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024; 149: 10941-10963. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12868-w>.
19. Lu M., Zhou B. *A one-way MANOVA test for high-dimensional data using clustering subspaces*. Statistics & Probability Letters. 2025; 217: 110293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2024.110293>.
20. Albert, C.M., Liew, K.C. *A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood*. Wood Science and Technology. 2025; 59: 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01665-3>.
21. Barzegar R., Yozgatligil A., Olgun H., Atimtay A.T. *TGA and kinetic study of different torrefaction conditions of wood biomass under air and oxy-fuel combustion atmospheres*. Journal of the Energy Institute. 2020; 93(3): 889-898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.001>.
22. Czajkowski Ł., Olek W., Weres J. *Effects of heat treatment on thermal properties of European Beech wood*. European Journal of Wood and Wood Products. 2020; 78(3): 425-431. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01525-w>.
23. Fraga L.G., Silva J., Teixeira S., Soares D., Ferreira M., Teixeira J. *Influence of operating conditions on the thermal behavior and kinetics of pine wood particles using thermogravimetric analysis*. Energies (Basel). 2020; 13(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112756>.
23. Lu X., Gu X. *A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency*. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2022; 15(1): 106. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0>.
24. Hill C., Altgen M., Rautkari L. *Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity*. Journal of Materials Science. 2021; 56(11): 6581-6614. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.
25. Nurazzi N.M., Asyraf M.R.M., Rayung M., Norrahim M.N.F., Shazleen S.S., Rani M.S.A., Shafi A.R., Aisyah H.A., Radzi M.H.M., Sabaruddin F.A., Ilyas R.A., Zainudin E.S., Abdan K. *Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments*. Polymers (Basel). 2021; 13(16): 2756. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162710>.
26. Shapchenkova O., Loskutov S., Aniskina A., Börcsök Z., Pásztor Z. *Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere*. European Journal of Wood and Wood Products. 2022; 80(2): 409-417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01763-6>.
27. Keržič E., Vek V., Oven P., Humar M. *Changes in wood durability due to leaching of biologically active substances (extractives) resulting from weathering*. Case Studies in Construction Materials. 2024; 21: e03921. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03921>.
28. Fetisova O.Yu., Mikova N.M., Taran O.P. *Ocenka primenivosti model'nyh i bezmodel'nyh metodov kineticheskogo analiza neizotermicheskogo piroliza kory pihty*. [Assessment of the applicability of model and model-free methods for kinetic analysis of non-isothermal pyrolysis of fir bark]. In: Kinetics and Catalysis, 2020; 6: 804-811.
29. Riaz S., Oluwoye I., Al-Abdeli Y.M. *Oxidative torrefaction of densified woody biomass: Performance, combustion kinetics and thermodynamics*. Renewable Energy. 2022; 199: 908-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.023>.
30. Koga N., Vyazovkin S., Burnham A.K., Favregeon L., Muravyev N., Pérez-Maqueda L.A., Saggese C., Sánchez-Jiménez P.E. *ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics*. Thermochimica Acta. 2023; 719: 179384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179384>.
31. Elkhailifa S., Mariyam S., Mackey H.R., Al-Ansari T., McKay G., Parthasarathy P. *Pyrolysis valorization of vegetable wastes: thermal, kinetic, thermodynamics, and Pyrogas analyses*. Energies (Basel). 2022; 15(17): 6277. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176277>.
33. Hwang Y.B., Park K.S., Yoo S.Y., Kim T.W. *Interplay of stress responses in pear tree revealed by chlorophyll fluorescence under combined Erwinia amylovora infection and temperature stress*. Horticulturae. 2025; 11(11): 1358. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111358>.
34. Maleki S.S., Mohammadi K., Movahedi A., Wu F. and Ji K.S. *Increase in cell wall thickening and biomass production by overexpression of PmCesA2 in poplar*. Frontiers in Plant Science. 2020; 11: 110. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00110>.

35. Han Y., Yang Y., Luo H., Cui J., Kuang B., Zhang X., Sun J., Xu J.W., Liu F. *Water stress reduces cellulose deposition in the cell wall and increases wax content, resulting in decreased fiber quality*. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 1(16): 1611390. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1611390>.
36. Han X., Zhao Y., Chen Y., Xu J., Jiang C., Wang X., Zhuo R., Lu M.Z., Zhang J. *Lignin biosynthesis and accumulation in response to abiotic stresses in woody plants*. *Forestry Research*. 2022; 12(2): 9. DOI: <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0009>.
37. Spies P.A., Keplinger T., Horbelt N., Reppe F., Scoppola E., Eder M., Fratzl P., Burgert I., Rüggeberg M. *Cellulose lattice strains and stress transfer in native and delignified wood*. *Carbohydrate Polymers*. 2022; 15(296): 119922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119922>.
38. Hang J., Tuskan G.A., Tschaplinski T.J., Muchero W., Chen J. *Transcriptional and post-transcriptional regulation of lignin biosynthesis pathway genes in Populus*. *Frontiers in Plant Science*. 2020; (11): 652. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00652>.
39. Ren W., Guo F., Zhu J. *A comparative study on the crystalline structure of cellulose isolated from bamboo fibers and parenchyma cells*. *Cellulose*. 2021; 28: 5993-6005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03892-w>.
40. Jalilian M., He Q., Hu Y. *Thermal Characterizations of Lignin*. In: Jawaid, M., Ahmad, A., Meraj, A. (eds.). Singapore: Springer, Singapore, 2025; 375-394. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0_16.

Сведения об авторах

✉ *Артемихина (Тюткова) Екатерина Александровна* – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: tyukatie@gmail.com.

Жила Сергей Викторович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории лесной пирологии, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: getgain@mail.ru.

Кулаков Сергей Сергеевич - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории защиты леса, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>, e-mail: muscul-kul@yandex.ru.

Демидко Денис Александрович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории защиты леса, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>, e-mail: sawer-beetle@yandex.ru.

Данилюк Юрий Владимирович - старший лаборант лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: ura_danilyk@mail.ru.

Анискина Антонина Александровна - научный сотрудник лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>, e-mail: aniskina_a@ksc.krasn.ru.

Information about the authors

✉ *Ekaterina A. Artemikhina (Tyutkova)* - Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: tyukatie@gmail.com.

Sergey V. Zhila – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Pyrology, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: getgain@mail.ru.

Sergey S. Kulakov – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>, e-mail: muscul-kul@yandex.ru.

Denis A. Demidko - Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>, e-mail: sawer-beetle@yandex.ru.

Yuriy V. Danilyuk - Senior Laboratory Research Assistant, Laboratory of Physical and Chemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: ura_danilyk@mail.ru.

Antonina A. Aniskina - Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>, e-mail: aniskina_a@ksc.krasn.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Мелиоративная эффективность полезащитных лесных полос с участием *PRUNUS ARMENIACA L.* в Ростовской области

Константин Н. Кулик¹, kulikk@vfanc.ru, <https://ORCID: 0000-0001-7124-8116>

Вадим В.Танюкевич¹✉, tanyukevich-v@vfanc.ru, <https://ORCID: 0000-0001-8052-6835>

Алексей К. Кулик¹, kulika@vfanc.ru, <https://ORCID: 0000-0001-5927-7336>

Валерий В. Танюкевич², valera148te@gmail.com, <https://ORCID: 0009-0009-0969-3214>

¹ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр. Университетский, д.97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Тимирязевская ул., 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация

Prunus armeniaca L. перспективная порода агролесомелиорации. Абрикос формирует полезащитные насаждения с *Fraxinus pennsylvanica Marsh.* в Ростовской области на площади 550 га. Мелиоративная эффективность насаждений обусловлена их надземной фитомассой, но роль древесной зелени в формировании ветровой тени ранее не изучалась. В 2005 – 2025 гг. исследовались четырехрядные ветрорегулирующие лесополосы, возрастом 50 лет, шириной 13 – 18 м, плотной конструкции. В Доно – Донецком, Нижне – Донском и Приазовском лесомелиоративных районах (ЛМР) абрикос в опушках четырехрядных ветрорегулирующих лесополос, второй ярус, сохранность 48%, высота 6,3 м – 9,0 м, $K_{ср}$ 2,7. Ясень образует первый ярус высотой 13 м – 10,2 м, сохранность 58 %, $K_{ср}$ 3,0. В Сальско-Манычском ЛМР абрикос усыхает, сохранность 5%, высота 5,3 м. Высота ясеня 8,0 м, $K_{ср}$ 4,0. Исследования проводились по общим методикам агролесомелиорации, на 20 пробных площадях. Фракцию древесной зелени в сырораствующем состоянии отбирали с модельных деревьев. Массу сухого вещества определяли термовесовым методом, рассчитывая фитонасыщенность лесополос. В Приазовском, Доно – Донецком и Нижне – Донском ЛМР фитонасыщенность первого яруса 0,03 кг/м³– 0,02 кг/м³, второго 0,05 кг/м³ – 0,03 кг/м³. Фитонасыщенность 2 яруса, увеличивая биофизическую плотность 1 яруса, выполняет роль дополнительного барьера, формируя ветровую тень 18 Н – 22 Н, что больше, чем у чистых ясеневых насаждений (11 - 14 Н). Лесополосы Сальско-Манычского ЛМР, с фитонасыщенностью до 0,01 кг/м³, не имеют мелиоративной эффективности, ветровая тень 5 Н. Насаждения мелиорируют 7249 га пашни. Потенциальный дополнительный урожай озимой пшеницы 1,6 тыс. тонн, стоимостью 22,7 млн. руб. Абрикос рекомендован для агролесомелиорации Ростовской области, за исключением Сальско-Манычского ЛМР, где лесополосы подлежат реконструкции.

Ключевые слова: полезащитное насаждение, абрикос, фитонасыщенность, ветровая тень, мелиоративное влияние

Финансирование: Исследования проводились в рамках реализации государственного задания FNFE-2025-0004 «Теоретическое обоснование и концепция адаптивных решений по управлению фитоэкологическими ресурсами агроландшафтов засушливой зоны РФ на бассейновом уровне, с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, многофакторного анализа влияния изменения климата и антропогенных нагрузок».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мелиоративная эффективность полезащитных лесных полос с участием *Prunus armeniaca* L. в Ростовской области / К. Н. Кулик, В. В. Таныukeвич, А. К. Кулик, В. В. Таныukeвич // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16 – № 1 (61). – С. 37–51. – Библиогр.: с. 48–50 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/3>.

Поступила 23.12.2025. Пересмотрена 29.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Article

Reclamation efficiency of forest shelterbelts with *Prunus armeniaca* L. in the Rostov Region

Konstantin N. Kulik¹, kulikk@vfanc.ru, <https://ORCID: 0000-0001-7124-8116>

Vadim V. Tanyukevich¹✉, tanyukevich-v@vfanc.ru, <https://ORCID: 0000-0001-8052-6835>

Aleksei K. Kulik¹, kulika@vfanc.ru, <https://ORCID: 0000-0001-5927-7336>

Valerii V. Tanyukevich², valera148te@gmail.com, <https://ORCID: 0009-0009-0969-321>

¹Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation

²Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract

Prunus armeniaca L. is a promising species for agroforestry. Apricot forms shelterbelts with *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. in the Rostov Region on an area of 550 hectares. The ameliorative efficiency of the stands is due to their aboveground phytomass, but the role of tree greenery in the wind shade formation has not previously been studied. Four-row wind-regulating shelterbelts, 50 years old, 13–18 m in wide, with a dense structure were studied from 2005 to 2025. In the Priazovsky, Dono-Donetsky and Nizhne-Donskoy forest reclamation districts (FRD), apricot grows at the edges of four-row wind-regulating shelterbelts and occupies the second forest tier. Its survival rate is 48%, height is 6.3 m – 9.0 m, Kav is 2.7. Ash forms the first forest tier with a height of 13 m – 10.2, survival rate of 58% and Kav of 3.0. In the Salsko-Manychsky FRD, apricot dries out. Its survival rate is 5%, height is 5.3 m. Ash height here is 8.0 m, Kav is 4.0. The studies were carried out on 20 test plots according to general methods of agroforestry. The fraction of wood greenery in the wet growing state was collected from model trees. The phytosaturation of shelterbelts was calculated with dry matter mass determination by the thermogravimetric method. In the Priazovsky, Dono-Donetsky and Nizhne-Donskoy FRDs, the phytosaturation of the first forest tier is 0.03 kg/m³ – 0.02 kg/m³, of the second forest tier is 0.05 kg/m³ – 0.03 kg/m³. The phytosaturation content of the second forest tier, increasing the biophysical density of the first tier, acts as an additional barrier, forming a wind shadow of 18 H – 22 H, which is greater than in pure ash stands (11 – 14 H). The shelterbelts of the Salsko-Manychsky FRD, with a phytosaturation content of up to 0.01 kg/m³, have no meliorative effectiveness; the wind shadow is 5 H. The stands reclaim 7249 hectares of arable land. The potential additional winter wheat yield is 1600 tons, valued at 22.7 million rubles. Apricot is recommended for agroforestry in the Rostov Region, with the exception of the Salsko-Manychsky forest management district, where the shelterbelts are subject to reconstruction.

Keywords: field-protective plantings, apricot, phytosaturation, wind shade, meliorative effect

Funding: the research was conducted within the framework of the implementation of the state task FNFE-2025-0004 "Theoretical substantiation and concept of adaptive solutions for the management of phytoecological resources of agrolandscapes of the arid zone of the Russian Federation at the basin level, using system-dynamic modeling of soil-hydrological processes, multivariate analysis of the impact of climate change and anthropogenic loads."

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

For citation: Kulik K. N., Tanyukevich V. V., Kulik A. K., Tanyukevich V. V. (2026). Reclamation efficiency of forest shelterbelts with *Prunus armeniaca* L. in the Rostov Region. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 37-51 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/3>.

Received 23.12.2025. **Revised** 29.01.2026. **Accepted** 15.03. 2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Программа действий по борьбе с опустыниванием в Ростовской области рекомендует более широкое применение в агролесомелиорации региона «многофункциональных» древесных пород, способных формировать эффективные и устойчивые агролесомелиоративные насаждения, обладающие ценными древесными и недревесными ресурсами [1].

По мнению ряда авторов, *Prunus armeniaca* L. является одной из перспективных пород агролесомелиорации – она обладает определенной засухо- и морозоустойчивостью, малотребовательна к почвенному плодородию [2,3]. Древесина абрикоса высоко ценится на внутреннем и внешнем рынках [4]. Порода является ценным медоносом [5]. Пищевую и медицинскую ценность плодов абрикоса отмечают зарубежные авторы [6].

В агролесомелиорации ветровую тень насаждений связывают с их фитонасыщенностью – отношением надземной фитомассы к надземному объёму лесополосы [7,8,9,10]. Это также подтверждают зарубежные исследования, построенные на моделировании – «продувании» надземной лесной фитомассы ветровым потоком с различной скоростью [11,12,13]. Крона абрикоса характеризуется развитой архитектоникой, с высокой фитонасыщенностью древесной зеленью [14]. Ранее была исследована мелиоративная роль надземной фитомассы чистых по составу ясеневых ползащитных насаждений [15], однако ветрорегулирующая роль древесной зелени лесополос с участием *Prunus armeniaca* L., ранее не изучалась.

В ползащитном лесоразведении Ростовской области, имеющей важное значение в аграрной экономике России, *Prunus armeniaca* L. используется как сопутствующая порода, преимущественно, с *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. [14]. Площадь таких насаждений в регионе 550 га [15]. Отсутствие данных по мелиоративной эффективности лесополос с участием в составе абрикоса обыкновенного затрудняет более широкое применение этой породы в агролесомелиорации, реализацию федерального закона № 4-ФЗ «О мелиорации земель» [16], а также приказа

Минсельхоза России от 26.04.2024 № 225 «Об утверждении Правил содержания и сохранения агролесомелиоративных насаждений и (или) агрофитомелиоративных насаждений» [17].

Материалы и методы

Исследования выполнялись в Ростовской области, в период с 2005 г. по 2025 г., с учётом лесомелиоративного районирования, разделяющего регион на Доно – Донецкий, Нижне – Донской, Приазовский и Сальско-Манычский лесомелиоративные районы (ЛМР) [15].

Цель изысканий – установить длину ветровой тени, формируемой ползащитными лесными полосами с участием в составе *Prunus armeniaca* L., определить площадь зон их мелиоративного влияния, а также рассчитать экономическую ценность насаждений.

Объекты исследований – четырехрядные ползащитные (ветрорегулирующие) насаждения, плотной конструкции, с *Prunus armeniaca* L. в качестве сопутствующей породы в опушечных рядах и главной породой *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. – в центральных рядах. Модальные лесополосы отбирали при анализе данных лесоинвентаризации на землях сельскохозяйственного назначения, проведенной в 2005 г. в Ростовской области ООО НПЦ «Кадастр», при участии В.В. Танюкевича. С этой целью были проработаны сведения по 466 насаждениям, площадью 550 га. В соответствии с ОСТ 56-69-83 были заложены 20 пробных площадей тренировочного типа, на которых выполняли перечислительную таксацию насаждений, фиксировалась их сохранность и ширина. При определении санитарного состояния лесополос (K_{cp}) руководствовались постановлением Правительства России № 2047, от 9.12.2020 г. С модельных деревьев проводился сбор древесной зелени (ГОСТ 21769-84. Зеленъ древесная. Технические условия = Tree verdure. Specifications: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23.03.84 № 923: введен впервые: дата введения 1985-01-01 / разработан Министерством лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности СССР. – Москва: Издательство

стандартов, 1984; Переиздание с Изменениями: Москва: Стандартинформ, 2010. – 7 с) в сырораствующем состоянии, со взвешиванием на электронных весах, с точностью ± 10 г. В лабораторных условиях проводили сушку образцов для определения массы в воздушно – сухом состоянии. Надземный объем насаждения, формирующего ветровую тень, определяли путем перемножения средней высоты, протяженности 1 га лесополосы и её ширины. Фитонасыщенность фракции древесной зелени устанавливали, как отношение ее массы к надземному объему насаждения. Ветровая тень лесных полос исследовалась на сельскохозяйственных полях (агрофон - чистый пар), примыкающих к модальным лесонасаждениям с западной (заветренной) стороны. Для изучения длины ветровой тени, перпендикулярно лесополосам, были заложены 20 профилей. При помощи метеостанции AQUA – LAB, в июне – августе, в точках учета, удаленных от лесополосы на расстояние, кратное 1Н, 2Н, 5Н, 10Н, 20Н, 30Н и 35Н (Н – высота насаждения) определялась скорость ветра (V, м/с) в трехкратной повторности. Крыльчатки анемометров располагали над поверхностью поля на высоте, кратной 0,1Н. Среднюю относительную скорость ветра находили как отношение скорости в точке наблюдения «i» к скорости ветра на контроле «к» (V_i / V_k). По общепринятым формулам математической статистики рассчитывали основные показатели дискретного ряда скорости ветра в зоне мелиоративного влияния лесных полос: коэффициент вариации (v, %), критерий Стьюдента ($t_{факт}$), точность опыта по изучению ветровой тени в зоне мелиоративного влияния лесополос (Р, %). Анализ данных выполняли в программе «Statistica». Кинетическую энергию ветрового потока определяли по формуле:

$$E_k = \frac{V^2 \cdot \rho}{2}, \quad (1)$$

где E_k – кинетическая энергия ветра, Дж/м³; V – скорость ветра на контроле, м/с; ρ – плотность воздуха (1,23 кг/м³).

Экономическую оценку мелиоративного ресурса агролесомелиорации давали с учетом установленной площади мелиоративного влияния 1 га насаждений с участием *Prunus armeniaca* L. Расчёт выполняли по зерну озимой пшеницы 3 класса, стоимостью 14221 руб./т. [18]. Среднюю урожайность в Ростовской области принимали по данным Росстата [19,20]. Нормативную прибавку урожая сельскохозяйственной культуры считали в размере 7% [21]. Затраты на уборку дополнительной сельхозпродукции учитывали в размере 4 % [15].

Результаты и обсуждение

Доно-Донецкий ЛМР в Ростовской области охватывает Доно-Донецкую равнину, Донскую грядку, Калачскую возвышенность, юго - восток

Северо-Приазовской равнины, южные и восточные отроги Донецкого кряжа. На востоке ЛМР граничит с Волгоградской областью, а на юге - с долиной р. Дон. Преобладающие почвы – черноземы обыкновенные. Территория – умеренно засушливая. Основные полевые лесные полосы размещены на местности с учетом восточного направления эрозионно-опасных ветров, средняя многолетняя скорость которых в июле - августе составляет 4,3 – 5,0 м/с. Нижне-Донской ЛМР включает в себя долину р. Дон в нижнем её течении - Доно-Егорлыкскую и Нижне-Донскую низменности, нижние части бассейнов рек Маныч и Сал. Территория является засушливой. Преобладающие почвы – черноземы южные, а также аллювиально-луговые и черноземовидные. Основные полевые насаждения размещены перпендикулярно господствующему направлению суховейных ветров восточного румба, средняя многолетняя скорость которых составляет 3,5 – 4,5 м/с. Приазовский ЛМР охватывает юг Ростовской области, а именно северо-западную часть Кубано-Приазовской низменности. На севере ЛМР граничит с долиной Дона (Нижне-Донской ЛМР), на юго-востоке - со Ставропольской возвышенностью. Территория умеренно засушливая. Преобладающие почвы – черноземы обыкновенные. На территории ЛМР полевые насаждения размещены перпендикулярно (то есть, север - юг) преобладающему направлению суховейных, дефляционно опасных ветров, со средней многолетней скоростью 4,2 – 4,7 м/с. Сальско-Манычский ЛМР находится между долиной Маныча и Доно-Сальским водоразделом, включая Сальско-Манычскую грядку. Территория характеризуется засушливым климатом. Распространены светло-каштановые и каштановые почвы. В данном субрегионе, как и в предыдущих ЛМР, основные полевые лесные полосы размещены перпендикулярно преобладающим суховейным и дефляционным ветрам восточного румба, со средней многолетней скоростью 3,7 – 4,9 м/с.

Prunus armeniaca L. вводился в опушечные ряды полевых (ветрорегулирующих) лесополос чистыми рядами, в смешении с главной породой - *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. Единично в составе таких насаждений участвуют *Ulmus pumila* L., *Acer campestre* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Gleditsia triacanthos* L. Густота посадки - 2,22 тыс. шт. / га, а в Сальско – Манычском ЛМР 1,667 тыс. шт. / га. Лесополосы состоят, как правило, из 4 рядов, ширина насаждений за счет разрастания 13 – 18 м. Отсутствие лесоводственных уходов в течение 20 – 30 лет привело к формированию плотной конструкции насаждений.

Характеристика полезащитных ветрорегулирующих насаждений с участием в составе *Prunus armeniaca* [L.](#), приведена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика полезащитных лесополос с участием *Prunus armeniaca* [L.](#) (возраст 45 – 50 лет; в числителе показатели ясеня, в знаменателе – абрикоса)

Table 1

Characteristics of field-protective forest belts with *Prunus armeniaca* L.

(age 45–50 years; ash trees in the numerator, apricot trees in the denominator)

Диаметр стволов, см / Trunks diameter, cm	Высота, м / Height, m	Сохранность, % / Integrity, %	К _{ср} / K _{average}	Запас, м ³ /га / Wood stock, m ³ /ha	Ширина, м / Width, m	Фитонасыщенность лесополосы древесной зеленью, кг/м ³ / Phytosaturation of the forest belt with woody greens, kg/m ³	Площадь, га / Area, ha
Доно – Донецкий ЛМР / Dono - Donetsk FRD							
По данным лесополос с инв. №№ / According to forest belts with inventory numbers 22,31,40,98,105							
<u>12±1</u> 11±1	<u>10,2±0,2</u> 6,3±0,1	<u>58±2</u> 48±1	<u>3,2±0,2</u> 2,9±0,1	<u>38,0±0,6</u> 20,2±0,2	14±1,5	<u>0,02</u> 0,04	143
Нижне – Донской ЛМР / Nizhne - Donskoy FRD							
По данным лесополос с инв. №№ / According to forest belts with inventory numbers 11,19,33,60,62							
<u>12±2</u> 12±1	<u>11,2±0,4</u> 7,1±0,2	<u>60±2</u> 45±1	<u>3,0±0,1</u> 2,8±0,2	<u>42,4±0,4</u> 24,4±0,3	13±2,0	<u>0,02</u> 0,03	176
Приазовский ЛМР / Priazovsky FRD							
По данным лесополос с инв. №№ / According to forest belts with inventory numbers 5,17,74,88,90							
<u>15±2</u> 13±2	<u>13,0±0,5</u> 9,0±0,3	<u>55±2</u> 50±2	<u>2,7±0,1</u> 2,4±0,2	<u>69,5±1,4</u> 36,6±1,1	16±2,0	<u>0,03</u> 0,05	126
Сальско – Манычский ЛМР / Salsko-Manychsky FRD							
По данным лесополос с инв. №№ / According to forest belts with inventory numbers 58,77,80,100,122							
<u>11±1</u> 10±1	<u>8,0±0,2</u> 5,3±0,1	<u>50±2</u> 5±1	<u>3,9±0,3</u> 4,0±0,1	<u>20,9±0,1</u> 1,2±0,2	18±2,5	<u>0,01</u> 0,002	105

Источник: собственные вычисления авторов /

Source: own calculations

Полезащитные лесные полосы Доно-Донецкого ЛМР представляют собой двухъярусные агролесомелиоративные насаждения, с четко выраженной дендрометрической дифференциацией надземного профиля. Средняя сохранность лесополос (53%) указывает на изреженность древостоев, активные процессы распада насаждений, свойственные 3 возрастному периоду. Данные явления обусловлены сложными лесорастительными условиями, описанными выше, внутри и межвидовой конкуренцией, отсутствием лесоводственных уходов на протяжении последних 20 – 30 лет. Санитарное состояние лесополос оценивается как сильно ослабленное, при этом *Prunus armeniaca* [L.](#) в смешанных с ясенем насаждениях, обладает несколько большей биологической устойчивостью – средневзвешенные балл К_{ср}, составляет, соответственно, 2,9 и 3,2. Последним обстоятельством объясняется то, что

фитонасыщенность лесополос древесной зеленью абрикоса в 2 раза больше фитонасыщенности ясеня – 0,04 кг/м³ и 0,02 кг/м³, соответственно. То есть, древесная зелень абрикоса способна создавать в лесополосах дополнительное аэродинамическое препятствие ветровому потоку на высоте до 6 м. Ясень, за счёт своей изреженности и низкой фитонасыщенности древесной зеленью, способен лишь частично рассеивать ветровой поток на высоте от 6 до 10 м.

Дендрометрические показатели полезащитных насаждений Нижне-Донского ЛМР близки к показателям лесополос в условиях Доно-Донецкого ЛМР, что объясняется соотносимыми лесорастительными условиями, описанными ранее. Здесь также сформировались четко выраженные двухъярусные ветрорегулирующие насаждения. Древостои третьего возрастного периода сильно изрежены (средняя сохранность 53%) по уже

описанным причинам. Ясень в насаждениях сильно ослаблен ($K_{\text{ср}} 3,0$), при этом балл состояния абрикоса несколько выше - 2,8. Важный фактор ветрорегулирующей способности лесополос, фитонасыщенность древесной зелены, у абрикоса достигает $0,03 \text{ кг/м}^3$, а у ясеня, как и в Доно – Донецком ЛМР не превышает $0,02 \text{ кг/м}^3$. Мелиоративная высота *Prunus armeniaca* [L.](#) 7 м, *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. 11 м. Ветрорегулирующие свойства насаждений аналогичны таковым в условиях Доно-Донецкого ЛМР и описаны выше.

Наилучшие лесоводственно-мелиоративные показатели полезационных (ветрорегулирующих) лесополос, с *Prunus armeniaca* [L.](#) и *Fraxinus pennsylvanica* Marsh., обусловленные весьма благоприятными лесорастительными условиями, характерны для Приазовского ЛМР. Показатели по высоте древостоев, 9 м и 13 м, соответственно, являются максимальными для региона исследований. Сохранность насаждений 50 % – 55 % - типична для лесополос 3 возрастного периода данного субрегиона, а также для смежного Краснодарского края [22]. Санитарное состояние абрикоса значительно лучше состояния ясеня, соответствует ослабленным насаждениям, большая часть деревьев породы жизнедеятельны. Фитонасыщенность древесной зелены 1 яруса *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. составляет $0,03 \text{ кг/м}^3$, второго яруса *Prunus armeniaca* [L.](#) $0,05 \text{ кг/м}^3$. Такая пористая биофизическая структура способна создавать протяженную ветровую тень за счёт весьма плотного аэродинамического препятствия в нижней и средней частях надземного профиля лесополос.

Полезационные насаждения Сальско – Манычского ЛМР усыхающие, величина $K_{\text{ср}}$ составляет 3,9 – 4,0. Абрикос к возрасту 45 – 50 лет (3 возрастной период), практически, полностью выпадает из состава ветрорегулирующих лесополос, его средняя сохранность на момент проведения исследований не превышала 5%, в то время как у ясеня этот показатель составлял 50%. Мелиоративная высота яруса главной породы составляла 8 м, в рамках которой фитонасыщенность древесной зелени не превышает $0,01 \text{ кг/м}^3$. Редкостойные абрикосовые опушки характеризуются крайне низкой фитонасыщенностью надземного профиля – не выше $0,002 \text{ кг/м}^3$. Таким образом, в

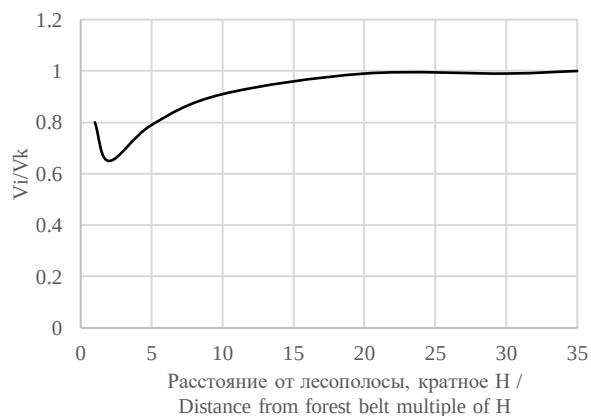
аэродинамическом смысле, агролесомелиоративные насаждения Сальско-Манычского ЛМР являются пористыми биофизическими барьерами с наименьшей для региона исследований плотностью органического вещества. Уплотнение конструкции лесополос в нижней части надземного профиля, за счёт повышенной фитонасыщенности абрикосовых опушек, отмеченное ранее в других ЛМР, для условий юго-востока региона исследований не характерно.

Следует отметить, что вышеописанное варьирование фитонасыщенности древесной зелены отмечено у лесополос визуальной плотной конструкции, площадь просветов в продольном профиле которых не превышает 10%. Это указывает на необходимость уточнения термина «конструкция» в современной агролесомелиорации, на что прямо и косвенно указывается в публикациях разных авторов [14,15,23].

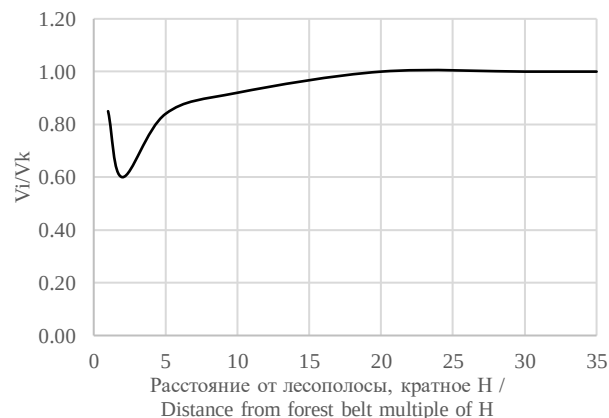
Результаты многолетних исследований ветровой тени в заветренной зоне мелиоративного влияния полезационных лесных полос с участием абрикоса обыкновенного представлены на рисунке 1.

В Доно-Донецком ЛМР, при средней многолетней скорости ветра не более $4,3 \text{ м/с}$ - 5 м/с , длина ветровой тени лесополос составила 20 Н, то есть 204 м. В заветренной зоне мелиоративного влияния насаждений скорость ветра составляла $3,8 \text{ м/с}$ – $4,4 \text{ м/с}$. Таким образом, лесные полосы здесь обеспечивают снижение скорости ветра не более чем на 12%. В условиях Нижне-Донского ЛМР в зоне мелиоративного влияния ветрорегулирующих насаждений с участием абрикоса, протяженность ветровой тени достигает 18Н, среднее значение V_i / V_k составило $0,89 \pm 0,1$. При многолетней скорости ветра на контроле от $3,5 \text{ м/с}$ до $4,5 \text{ м/с}$, в заветренной зоне мелиоративного влияния насаждений скорость ветрового потока не превышала $14,4 \text{ км/ч}$. Длина ветровой тени полезационных насаждений с участием абрикоса в Приазовском ЛМР составила 22Н (286 м), что является наибольшим показателем в регионе исследований. В среднем скорость ветра в этом пространстве (V_i / V_k) не превышает 85% ($3,6 \text{ м/с}$ – $4,0 \text{ м/с}$) от значений на контроле ($4,2 \text{ м/с}$ – $4,7 \text{ м/с}$). Ветровая тень лесополос Сальско-Манычского ЛМР имеет незначительную протяженность 5Н (не более 40 м), где скорость ветра относительно контроля снижается незначительно – не более 8 % (V_i / V_k составляет $0,92 \pm 0,1$).

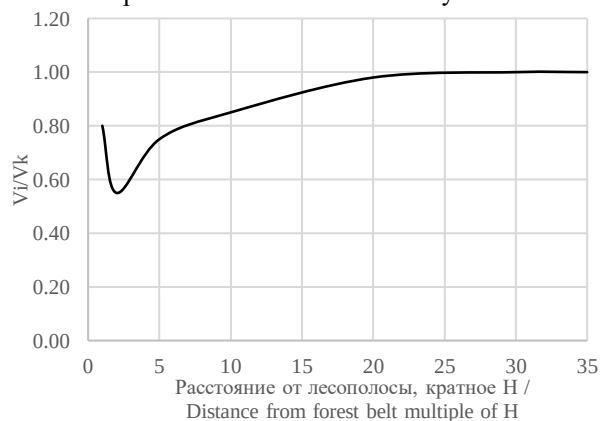
Доно-Донецкий ЛМП / Dono - Donetsk FRD



Нижне-Донской ЛМП / Nizhne - Donskoy FRD



Приазовский ЛМП / Priazovsky FRD



Сальско-Маньчский ЛМП / Salsko - Manychsky FRD

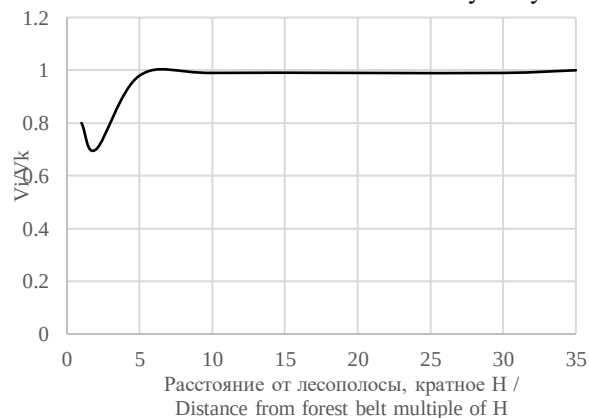


Рисунок 1. Ветровая тень полезащитных лесополос с участием в составе *Prunus armeniaca* [L.](#)

Figure 1. Wind shade of field-protective forest belts with *Prunus armeniaca* L. as their part

Источник: собственные вычисления авторов /

Source: own calculations

Анализ параметров ветровой тени полезащитных насаждений приводится в таблице 2.

Таблица 2

Параметры ветровой тени в заветренной зоне мелиоративного влияния лесных полос с участием *Prunus armeniaca* L.

Table 2

Wind shade parameters in the leeward part of meliorative influence zone of forest belts with *Prunus armeniaca* L.

Длина ветровой тени, м / Wind shade length, m	Среднее значение V_i / V_k в зоне мелиоративного влияния лесополос / Average value of V_i / V_k in meliorative influence zone of forest belts	Статистические параметры ряда V_i / V_k / Statistical parameters of the V_i / V_k series		
		коэффициент вариации (v), % / coefficient of variation (v), %	критерий Стьюдента, $t_{\text{факт}}$ / Student's criterion, t_{fact}	точность статистического ряда (P), % / accuracy of statistical series (P), %
Доно-Донецкий ЛМР / Dono - Donetsk FRD				
204	0,88±0,1	14	17,6	5,7
Нижне – Донской ЛМР / Nizhne - Donskoy FRD				
198	0,89±0,1	15	17,8	5,6
Приазовский ЛМР / Priazovsky FRD				
286	0,85±0,1	18	14,2	7,1
Сальско-Манычский ЛМР / Salsko-Manychsky FRD				
40	0,92±0,1	12	23,0	4,3

Примечание: $t_{\text{табл}}(95\%) = 2,4$; $t_{\text{табл}}(99\%) = 3,7$.

Источник: собственные вычисления авторов / Source: own calculations

Как видно из таблицы 2, совокупность полученных данных является однородной (значения v изменяются от 12% до 18%), статистически значимой ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$) и характеризуется достаточно высокой точностью P (4,3% - 7,1%). Таким образом, полученные в ходе многолетних исследований данные по параметрам ветровой тени ползащитных насаждений с участием абрикоса обыкновенного являются надежными и достоверными.

Механизм формирования ветровой тени в заветренном пространстве лесополос Доно – Донецкого, Нижне-Донского и Приазовского ЛМР, с участием в составе *Prunus armeniaca* L., следующий. В биофизическом смысле лесное насаждение – это пористое тело, с различной плотностью (фитонасыщенностью), изменяющейся по ярусам. Древесная зелень абрикоса в опушечных рядах второго яруса, фитонасыщенностью от 0,03 кг/м³ до 0,05 кг/м³, в совокупности с фитонасыщенностью ясеня первого яруса от 0,02 кг/м³ до 0,03 кг/м³, выполняет роль дополнительного ветрозащитного барьера, способного в значительной степени поглотить кинетическую энергию ветрового потока в пределах 7,5 – 15,31 Дж/м³. Данная энергия преобразуется в механическую (движение древесной зелени) и тепловую энергии [23]. Таким образом, абрикос усиливает мелиоративную эффективность ползащитных насаждений. Ясеньевый первый ярус, в силу существенно

меньшей фитонасыщенности, в сравнении со вторым, абрикосовым ярусом, способен оказать незначительное аэродинамическое сопротивление ветровому потоку указанной ранее силы.

Ползащитные лесные полосы Сальско-Маньчского ЛМР, в силу неудовлетворительного состояния и крайне низкой фитонасыщенности надземного профиля древесной зелени (до 5,3 м высоты - 0,012 кг/м³; от 5,3 м до 8 м – 0,01 кг/м³) не оказывают существенного сопротивления ветровому потоку с кинетической энергией 14,7 Дж/м³.

Ранее нами была установлена длина ветровой тени чистых ясеньевых лесных полос в условиях Ростовской области [14,15]. Как следует из проведенных исследований, в Доно-Донецком и Приазовском ЛМР она составила 11Н, в Нижне – Донском 14Н, в Сальско – Маньчском ЛМР 15Н. Из сравнения видно, что применение абрикоса обыкновенного в качестве сопутствующей ясеню зеленому древесной породы в ползащитном лесоразведении способствует существенному повышению мелиоративной эффективности насаждений в условиях северо-запада, центра, а также юга региона исследований. В Сальско-Маньчском ЛМР чистые ясеньевые лесополосы имеют протяженность ветровой тени 15Н, что значительно больше, чем у лесополос с абрикосом (5Н). Это объясняется тем, что данная порода, сама

слабо адаптированная к сложным лесорастительным условиям юго - восточной части региона исследований, создает межвидовую конкуренцию ясеню зеленому, ухудшая его дендрометрические показатели. Так, чистые четырехрядные полезащитные насаждения *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. Сальско – Манычского ЛМП в возрасте 50 лет имеют высоту 8,2 м, диаметр стволов 10,6 см, запас древесины 40 м³ / га [14,15]. Таким образом, применение *Prunus armeniaca* L. в агролесомелиорации юго-востока Ростовской области нецелесообразно.

С учетом ширины полезащитных насаждений (таблица 1), установленной длины ветровой тени (рисунок 1, таблица 2) рассчитаны площади зон мелиоративного влияния лесополос с участием абрикоса обыкновенного (рисунок 2). Как следует из рисунка 2, площадь зоны, мелиорируемой

1 га полезащитных ветрорегулирующих лесополос с участием абрикоса обыкновенного, в условиях Ростовской области варьирует в широких пределах: от 2,2 га в Сальско-Манычском ЛМП, до 17,9 га в Приазовском ЛМП. Общая площадь мелиорируемых насаждениями сельхозугодий в Ростовской области оценивается в 7249 га.



Рисунок 2. Площадь пашни, мелиорируемой полезащитными насаждениями с участием *Prunus armeniaca* L.
(А – площадь пашни, мелиорируемой 1 га полезащитных насаждений;
Б – общая площадь мелиорируемой пашни)

Figure 2. Area of arable land reclaimed by field-protective forest belts with *Prunus armeniaca* L.
(А – area of arable land reclaimed by 1 ha of field-protective forest belts; Б – total area of reclaimed arable land)

Источник: собственные вычисления авторов /
Source: own calculations

Расчёт потенциального дохода от мелиоративного влияния 1 га полезащитных (ветрорегулирующих) лесных полос с участием в составе *Prunus armeniaca* L., приводится в таблице 3. Из расчёта следует, что в Ростовской области максимальной ценностью мелиоративного ресурса характеризуются полезащитные насаждения Приазовского ЛМП – 64,8 тыс. руб. / га. Ветрорегулирующие лесополосы Доно – Донецкого

и Нижне – Донского ЛМП способны обеспечить потенциальный доход от 41,1 тыс. руб./га до 46,5 тыс. руб./га, соответственно. Наименьшей экономической ценностью мелиоративного ресурса характеризуются насаждения с участием абрикоса в Сальско – Манычском ЛМП – не более 4,1 тыс. руб./га. Среднее значение показателя по региону исследований равно 39,1 тыс. руб./га.

Таблица 3

Потенциальный доход от мелиоративного влияния 1 га полезащитных насаждений

Table 3

Potential melioration effect income of 1 hectare of field-protective forest plantings

Средний урожай озимой пшеницы, т/га / Average winter wheat yield, t/ha	Дополнительный урожай в зоне мелиоративного влияния лесополос, т / Additional yield in the meliorative influence zone of forest belts, t	Выручка от дополнительного урожая, тыс. руб. / Revenue from additional harvest, thousand rubles	Затраты на уборку дополнительного урожая, тыс. руб. / Costs of additional yield harvesting, thousand rubles	Потенциальный доход от реализации дополнительного урожая, тыс. руб. / Potential income from additional crops selling, thousand rubles
Доно-Донецкий ЛМП / Dono - Donetsk FRD				
2,95	3,01	42,8	1,7	41,1
Нижне-Донской ЛМП / Nizhne - Donskoy FRD				
3,20	3,41	48,4	1,9	46,5
Приазовский ЛМП / Priazovsky FRD				
3,80	4,75	67,5	2,7	64,8
Сальско-Манычский ЛМП / Salsko-Manychsky FRD				
1,95	0,30	4,3	0,2	4,1

Источник: собственные вычисления авторов /

Source: own calculations

На основе данных таблицы 3 рассчитан доход от совокупного мелиоративного влияния 550 га полезащитных насаждений с участием в породном составе абрикоса обыкновенного (рисунк 3).

Таким образом, *Prunus armeniaca* L. в смешении с *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. в агролесомелиоративных насаждениях Ростовской области, способны формировать ежегодную прибавку урожая озимой пшеницы общей стоимостью 22,7 млн руб.

Заключение

В Ростовской области *Prunus armeniaca* L. является сопутствующей породой в четырехрядных полезащитных ветрорегулирующих насаждениях в смешении с *Fraxinus pennsylvanica* Marsh., созданных по стандартной для степной зоны технологии, на площади 550 га. Ширина лесополос

13 – 18 м, возраст 45 -50 лет, конструкция - плотная. В условиях Приазовского, Доно – Донецкого и Нижне – Донского ЛМП ясень формирует первый ярус высотой 13 м – 10,2 м, балл санитарного состояния 3,0. Абрикос формирует второй ярус в опушечных рядах, высотой 6,3 м – 9,0 м, со средним баллом санитарного состояния 2,7. В Сальско-Манычском ЛМП абрикос выпадает из состава полезащитных насаждений в 1 – 2 возрастном периодах, его сохранность не более 5%, высота 5,3 м. Высота ясеня 8,0 м, средний балл санитарного состояния 4,0, сохранность 50%.

Полезащитные ветрорегулирующие насаждения являются пористой биофизической структурой, где важным фактором, определяющим мелиоративную эффективность лесополос, является разная фитонасыщенность ярусов надземного профиля древесной зелены. В первом, ясеневом

ярусе насаждений Приазовского, Доно – Донецкого и Нижне – Донского ЛМР, значение фитонасыщенности $0,03 \text{ кг/м}^3$ – $0,02 \text{ кг/м}^3$, во втором, абрикосовом ярусе, $0,05 \text{ кг/м}^3$ – $0,03 \text{ кг/м}^3$. Древесная зелень абрикоса в опушке, в суммации с древесной зеленью ясеня первого яруса, выполняет роль дополнительного ветрозащитного барьера, формирующего ветровую тень, длиной $18H$ – $22H$. Полезащитные лесополосы Сальско-Маньчского ЛМР, по причине неудовлетворительного состояния, имеют крайне низкую фитонасыщенность

древесной зеленью – от $0,002 \text{ кг/м}^3$ до $0,01 \text{ кг/м}^3$, мелиоративная эффективность насаждений незначительна – длина их ветровой тени не более $5H$.

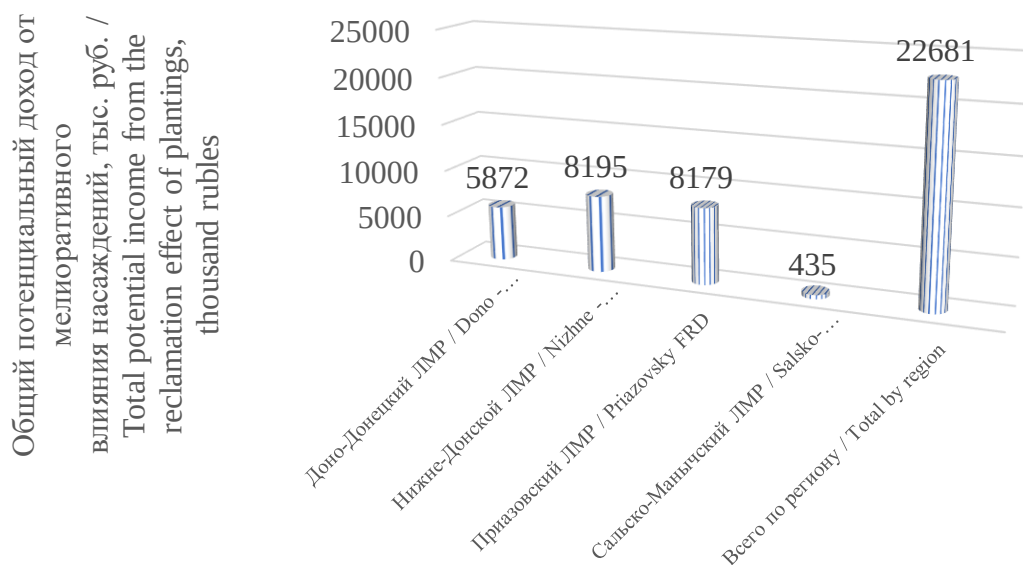


Рисунок 3. Общий потенциальный доход от мелиоративного влияния полезащитных насаждений с участием *Prunus armeniaca* L. в Ростовской области

Figure 3. Total potential income from the reclamation impact of shelterbelt plantings with *Prunus armeniaca* L. in the Rostov Region

Источник: собственные вычисления авторов /

Source: own calculations

Полезащитные ветрорегулирующие насаждения с участием абрикоса обыкновенного способны мелиорировать 7249 га пашни и обеспечивать дополнительный урожай озимой пшеницы в размере 1,6 тыс. тонн. Ценность мелиоративного ресурса составляет 22,7 млн. руб.

При разработке проектов агролесомелиорации земель в Ростовской области *Prunus armeniaca* L. рекомендуется в качестве сопутствующей породы для Доно-Донецкого,

Нижне-Донского и Приазовского ЛМР. Применение абрикоса обыкновенного в полезащитном лесоразведении Сальско-Маньчского ЛМР нецелесообразно по причине его неудовлетворительного состояния и крайне низкой мелиоративной эффективности. Существующие насаждения рекомендуется реконструировать.

Список литературы

1. Турчин Т.Я., Ребриев Ю.А., Арчаков Д.И. и др. Национальная программа действий по борьбе с опустыниванием Ростовской области. Волгоград – Ростов-на-Дону: Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2024. - 240 с.
2. Рыбашлыкова Л.П., Соломенцева А.С., Солонкин А.В. Оценка состояния и биологических особенностей древесно-кустарниковых видов растений в условиях аридной зоны // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. - 2022. - Т. 15. - № 1(72). - С. 108-120.
3. Манаенков А.С. Подходы к улучшению состояния полезащитных лесных полос на Северном Кавказе // Лесоведение. - 2023. - № 4. - С. 412 - 426. DOI 10.31857/S002411482304006X.
4. Захаров В.Л., Шубкин С.Ю., Дубровина О.А., Гулидова В.А. Сравнительный Биохимический состав древесины малосмолистых лесных пород Липецкой области // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2024. – № 3. – С. 60-63. DOI 10.31857/S2500208224030137. – EDN YXCZMO.
5. Самсонова И.Д. Ресурсный потенциал медоносных растений степного Придонья // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 1(391). – С. 51-64. DOI 10.37482/0536-1036-2023-1-51-64. – EDN YWLKRO.
6. Alajil O., Sagar V.R., Kaur, C., et al. Nutritional and Phytochemical Traits of Apricots (*Prunus Armeniaca* L.) for Application in Nutraceutical and Health Industry. *Foods*. 2021; 10: 1344. - DOI:10.3390/foods1006134.
7. Дубенок Н.Н. Фитонасыщенность полезащитных лесных полос и их мелиоративное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – № 1. – С. 27-30. EDN VZSWFD.
8. Уразов П.Н. Структура надземной фитомассы насаждений в защитных лесных полосах Свердловской железной дороги // Леса России и хозяйство в них. – 2025. – № 1(92). – С. 4-17. DOI 10.51318/FRET.2025.92.1.001. EDN TXMNDE.
9. Уразов П.Н., Усольцев В.А., Уразова А.Ф., Плюха Н.И. Морфология крон деревьев в защитных лесных полосах вдоль железной дороги Екатеринбург - Каменск-Уральский // Леса России и хозяйство в них. – 2025. – № 3(94). – С. 22-29. DOI 10.51318/FRET.2025.94.3.003. EDN NWPKSX.
10. Усольцев В.А., Плюха Н.И. Содержание сухого вещества во фракциях надземной фитомассы лесобразующих видов Евразии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2025. – № 1(65). – С. 6-18. DOI 10.25686/2306-2827.2025.1.6. EDN CVACMC.
11. Zhang S., Liu G., Cui Q., Huang Z., Ye X., & Cornelissen J. H. C. New field wind manipulation methodology reveals adaptive responses of steppe plants to increased and reduced wind speed. *Plant Methods*. 2021; 17:5. – <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00705-2>.
12. Chaudhari A., Ashu T., Vita G., Hellsten A. Impact of Forest Density on Atmospheric Boundary-Layer Flow and Turbulence for Wind Energy Applications. *Boundary-Layer Meteorology*. 2026; 192:13. - <https://doi.org/10.1007/s10546-025-00959-0>.
13. Jiang N., Cheng H., Liu C., Fang Z., & Zou X. A wind tunnel study of the effects of vegetation structural characteristics on the airflow field. *Catena*. 2024; 108064: 25-50. - <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108064>.
14. Танюкевич В.В. Продуктивность и мелиоративная роль лесных полос степных агролесоландшафтов. Новочеркасск: Лик, 2012. - 175 с.
15. Ивонин В.М., Танюкевич В.В. Адаптивная лесомелиорация степных агроландшафтов. М.: Вузовская книга, 2011. - 240 с.
16. О мелиорации земель: Федеральный закон от 10.01.1996 № 4-ФЗ (с изменениями и дополнениями) // Информационно-правовой портал «Гарант». – URL: <https://base.garant.ru/10108787/?ysclid=mkjhs6sjuu980488550> (дата обращения: 14.12.2025). – Текст: электронный.
17. Об утверждении Правил содержания и сохранения агролесомелиоративных насаждений и (или) агрофитомелиоративных насаждений: Приказ Минсельхоза России от 26.04.2024 № 225 // Информационно-правовой портал «Гарант». – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408982566/?ysclid=mkji3ybtn2226375098> (дата обращения: 14.12.2025). – Текст: электронный.
18. Пульс дон.рф. – 2025. - URL: <https://xn--80ahujedpo6f.xn--plai/v-rostovskoj-oblasti-zerno-prodovolstvennoj-pshenichy-3-klassa-stoit-stolko-zhe-skolko-i-yachmen> (дата обращения: 03.11.2025).
19. Сельское хозяйство в России. 2025: статистический сборник. М.: Росстат, 2025. – 81 с.
20. Ростовская область в цифрах. 2025: статистический сборник. Ростов-на-Дону: Ростовстат, 2025. – 47 с.

21. Трибунская В.М., Кузьмина Т.С. Нормативы прибавок урожая важнейших сельскохозяйственных культур от мелиоративного влияния полевых защитных лесных полос. М.: Агропромиздат, 1984. - 99 с.
22. Примаков Н.В. Ясеновые полевые защитные лесные полосы Кореновского района Краснодарского края // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. - 2025. - № 5(407). - С. 81-91. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83083955>.
23. Enescu C.M., Mihalache M., Ilie L., Dinca L., Constandache, C., Murariu, G. Agricultural Benefits of Shelterbelts and Windbreaks: A Bibliometric Analysis. Agriculture. 2025; 1204: 1-30. - <https://doi.org/10.3390/agriculture15111204>.

References

1. Turchin T.Ya., Rebriev Yu.A., Archakov D.I. et al. *Natsional'naya programma dejstvij po bor'be s opustynivaniem Rostovskoj oblasti*. [The National Action Program to combat desertification in the Rostov Region]. – Volgograd-Rostov-na-Donu: FSC of Agroforestry RAS Publ. house, 2024: 240. (In Russ.).
2. Rybashlykova L.P., Solomentseva A.S., Solonkin A.V. *Otsenka sostoyaniya i biologicheskikh osobennostej drevesno-kustarnikovyx vidov rastenij v usloviyakh aridnoj zony*. [Assessment of the condition and biological features of woody and shrubby plant species in the arid zone]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University, 2022; 15(72): 108-120. (In Russ.). DOI 10.53914/issn2071-2243_2022_1_108.
3. Manaenkov A.S. Podkhody k uluchsheniyu sostoyaniya polezashchitnykh lesnykh polos na Severnom Kavkaze. [Approaches to improving the protective forest belts condition in the North Caucasus]. Lesovedenie = Forest Science, 2023; 4: 412-426. (In Russ.). DOI 10.31857/S002411482304006X.
4. Zakharov V.L., Shubkin S.Yu., Dubrovina O.A., Gulidova V.A. *Sravnitel'nyy Biokhimicheskij sostav drevesiny malosmolistykh lesnykh porod Lipetskoj oblasti*. [Comparative Biochemical composition of low-resinous wood species of the Lipetsk Region]. Vestnik Rossijskoj sel'skokhozyajstvennoj nauki = Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2024; 3: 60-63. (In Russ.). DOI 10.31857/S2500208224030137. EDN YXCZMO.
5. Samsonova I.D. *Resursnyj potentsial medonosnykh rastenij stepnogo Pridon'ya* [Resource potential of honey-bearing plants in the steppe part of Near-Don region]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal. 2023; 1(391): 51-64. (In Russ.). DOI 10.37482/0536-1036-2023-1-51-64. EDN YWLKRO.
6. Alajil O., Sagar V.R., Kaur, C., et al. *Nutritional and Phytochemical Traits of Apricots (Prunus Armeniaca L.) for Application in Nutraceutical and Health Industry*. Foods. 2021; 10: 1344. - DOI:10.3390/foods1006134.
7. Dubenok N.N. *Fitonasyschennost' polezashchitnykh lesnykh polos i ikh meliorativnoe vliyanie na urozhajnost' sel'skokhozyajstvennykh kul'tur*. [Phytosaturation of protective forest belts and their reclamation effect on crop yields]. Vestnik Rossijskoj sel'skokhozyajstvennoj nauki = Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2016; 1: 27-30. (In Russ.). EDN VZSWFD.
8. Urazov P.N. *Struktura nadzemnoj fitomassy nasazhdenij v zashchitnykh lesnykh polosakh Sverdlovskoj zheleznoj dorogi* [The structure of the plantings aboveground phytomass in the protective forest belts along the Sverdlovsk railway]. Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh = Forests of Russia and economy in them. 2025; 1: 4-17. (In Russ.). DOI 10.51318/FRET.2025.92.1.001. EDN TXMND.
9. Urazov P.N., Usol'tsev V.A., Urazova A.F., Plyukha N.I. *Morfologiya kron derev'ev v zashchitnykh lesnykh polosakh vdol' zheleznoj dorogi Ekaterinburg - Kamensk-Ural'skij*. [Morphology of tree crowns in protective forest belts along the Yekaterinburg-Kamensk-Uralsky railway]. Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh = Forests of Russia and economy in them. 2025; 3: 22-29. (In Russ.) DOI 10.51318/FRET.2025.94.3.003. EDN NWPXSX.
10. Usol'tsev V.A., Plyukha N.I. *Soderzhanie sukhogo veshchestva vo fraktsiyakh nadzemnoj fitomassy lesoobrazuyushchikh vidov Evrazii* [Dry matter content in fractions of Eurasian forest-forming species aboveground phytomass] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Vestnik of Volga state university of technology. Series: Forest. Ecology. Nature management. 2025; 1(65): 6-18. (In Russ.) DOI 10.25686/2306-2827.2025.1.6. EDN CVACMC.
11. Zhang S., Liu G., Cui Q., Huang Z., Ye X., & Cornelissen J. H. C. *New field wind manipulation methodology reveals adaptive responses of steppe plants to increased and reduced wind speed*. Plant Methods. 2021; 17:5. – <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00705-2>.
12. Chaudhari A., Ashu T., Vita G., Hellsten A. *Impact of Forest Density on Atmospheric Boundary-Layer Flow and Turbulence for Wind Energy Applications*. Boundary-Layer Meteorology. 2026; 192:13. - <https://doi.org/10.1007/s10546-025-00959-0>.
13. Jiang N., Cheng H., Liu C., Fang Z., & Zou X. *A wind tunnel study of the effects of vegetation structural characteristics on the airflow field*. Catena. 2024; 108064: 25. - <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108064>.

14. Tanyukevich V.V. *Produktivnost' i meliorativnaya rol' lesnykh polos stepnykh agrolesolandshaftov* [Productivity and the reclamation role of forest belts in steppe agroforestry landscapes]. – Novocherkassk: "Lik" Publ. house, 2012: 175. (In Russ.).
15. Ivonin V.M., Tanyukevich V.V. *Adaptivnaya lesomelioratsiya stepnykh agrolandshaftov* [Adaptive forest reclamation of steppe agrolandscapes]. – М.: Vuzovskaya kniga Publ. house. 2011; 240. (In Russ.).
16. *Federal'nyj zakon ot 10.01.1996 № 4-FZ (s izmeneniyami i dopolneniyami) «O melioracii zemel'»* [On land reclamation: Federal Law of January 10, 1996 No. 4-FZ (as amended)]. (1996). "Garant" Informatively and juridical portal. Retrieved December 14, 2025, from URL: <https://base.garant.ru/10108787/?ysclid=mkjhs6sjuu980488550>. (in Russ.).
17. *Prikaz Minsel'khoza Rossii ot 26.04.2024 № 225: "Ob utverzhdenii Pravil sodержaniya i sokhraneniya agrolesomeliorativnykh nasazhdenij i (ili) agrofitomeliorativnykh nasazhdenij"* [On approval of the Rules for the maintenance and conservation of agroforestry and (or) agrophytomeliorative plantations: Order of the Ministry of Agriculture of Russia]. (2024). Informacionno-pravovoj portal «Garant». Retrieved December 14, 2025, from URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408982566/?ysclid=mkji3ybtn2226375098>. (in Russ.).
18. Pul's Dona.rf. – 2025. – URL: <https://xn--80ahujedpo6f.xn--plai/v-rostovskoj-oblasti-zerno-prodovolstvennoj-pshenichy-3-klassa-stoit-stolko-zhe-skolko-i-yachmen> (access date: 03.11.2025).
19. *Sel'skoe khozyajstvo v Rossii. 2025: statisticheskij sbornik*. [Agriculture in Russia 2025: Statistical Digest]. М.: Rosstat Publ. house. 2025: 81. (In Russ.).
20. *Rostovskaya oblast' v tsifrax. 2025: statisticheskij sbornik*. [Rostov Region in numbers 2025: Statistical Digest] Rostov-na-Donu: Rostovstat Publ house. 2025; 47. (In Russ.).
21. Tribunskaya V.M., Kuz'mina T.S. Normativy pribavok urozhaya vazhnejshikh sel'skokhozyajstvennykh kul'tur ot meliorativnogo vliyaniya polezashchitnykh lesnykh polos. [Standards of yield increases of the most important agricultural crops from the reclamation effect of protective forest belts]. – М.: Agropromizdat Publ. house. 1984; 99. (In Russ.).
22. Primakov N.V. *Yasenevye polezashchitnye lesnye polosy Korenovskogo rajona Krasnodarskogo kraja* [Ash protective forest belts of the Korenovsky district of the Krasnodar Territory]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoy zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2025; 5(407): 81-91. (In Russ.). DOI 10.37482/0536-1036-2025-5-81-91.
23. Enescu C.M., Mihalache M., Ilie L., Dinca L., Constandache, C., Murariu, G. *Agricultural Benefits of Shelterbelts and Windbreaks: A Bibliometric Analysis. Agriculture*. 2025; 1204: 30. – <https://doi.org/10.3390/agriculture15111204>.

Сведения об авторах

Кулик Константин Николаевич – доктор с.-х. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии агролесоландшафтов, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97, <https://ORCID: 0000-0001-7124-8116>, e-mail: kulikk@vfanc.ru.

☒ *Танюкевич Вадим Викторович* – доктор с.-х. наук, профессор, лаборант-исследователь лаборатории гидрологии агролесоландшафтов, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97, <https://ORCID: 0000-0001-8052-6835>, tanyukevich-v@vfanc.ru.

Кулик Алексей Константинович – кандидат с.-х. наук, заведующий лабораторией гидрологии агролесоландшафтов, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97, <https://ORCID: 0000-0001-5927-7336> kulika@vfanc.ru.

Танюкевич Валерий Вадимович – аспирант, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, <https://ORCID: 0009-0009-0969-3214>, valera148te@gmail.com.

Information about the authors

Konstantin N. Kulik – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Agroforest Landscape Hydrology, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, <https://ORCID: 0000-0001-7124-8116>, e-mail: kulikk@vfanc.ru.

✉ *Vadim V. Tanyukevich* – Doctor of Agricultural Sciences. Sciences, Professor, Laboratory Assistant – Researcher, Laboratory of Hydrology of Agroforestry Landscapes, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 400062, Volgograd, Universitetsky Ave., 97, <https://ORCID: 0000-0001-8052-6835>, tanyukevich-v@vfanc.ru.

Aleksey K. Kulik – PhD in Agriculture, Head of the Laboratory of Agroforest Landscape Hydrology, Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation, and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97 Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russia, <https://ORCID: 0000-0001-5927-7336> kulika@vfanc.ru.

Valery V. Tanyukevich – Postgraduate Student, Timiryazev State Agricultural University of Russia, 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia, <https://ORCID: 0009-0009-0969-3214>, valera148te@gmail.com.

✉ Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/4>

УДК 630*228.1(470.312)



Изменения основных таксационных характеристик лесного фонда Подмосковной Мещеры в первой четверти XXI века

Александр В. Лебедев¹✉, alebedev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

Владимир П. Захаров², zakharov@forest.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0176-6053>

Сергей А. Коротков^{3,4}, skorotkov-71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2754-6014>

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», /ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация

²ГАУ МО «Мособллес», Рублево-Успенское шоссе, 1-й километр, д. 1А, д. Раздоры, Одинцовский г.о., Московская обл., 143082, Российская Федерация

³Мытищинский филиал ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., 141005, Российская Федерация

⁴ФГБУН Институт лесоведения Российской академии наук, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Одинцовский г.о., Московская обл., 143030, Российская Федерация

В статье представлены результаты анализа динамики основных таксационных показателей лесных насаждений Подмосковной Мещеры за период 2000–2020 гг. на основе данных лесоустройства двух ревизионных периодов (2000–2002 и 2018–2020 гг.). Объектом исследования стали земли лесного фонда Егорьевского, Ногинского, Орехово-Зуевского, Шатурского и части Виноградовского лесничеств общей площадью 433,2 тыс. га. Методика включала сравнение породного состава, возрастной структуры, распределения по типам леса, а также расчет средних значений возраста, класса бонитета, полноты, запаса и годичного прироста для основных лесобразующих пород (сосна, ель, береза, осина). Выявлено, что за два десятилетия произошли существенные структурные изменения: общая лесопокрытая площадь увеличилась на 9%, однако доля хвойных насаждений сократилась с 61% до 49% за счет резкого уменьшения площадей ельников (с 10% до 4%). Одновременно отмечается значительный рост доли березняков (с 35% до 44%). Выявлена тенденция старения древостоев (средний возраст увеличился с 61 до 68 лет) и сильная неравномерность их возрастного распределения. Основными факторами изменений стали последствия массовой вспышки короеда-типографа (2012–2015 гг.), повлекшей масштабные санитарные рубки в ельниках, лесные пожары. На нарушенных территориях происходит активное естественное возобновление березы. Полученные данные свидетельствуют об отклонении динамики лесов от естественных сукцессионных трендов и формировании производных лиственных сообществ. На основе результатов предложены адаптивные лесохозяйственные мероприятия, направленные на формирование устойчивых разновозрастных и смешанных насаждений.

Ключевые слова: *Подмосковная Мещера, динамика лесов, таксационные показатели, породный состав, возрастная структура, лесной фонд, производительность лесов*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лебедев, А. В. Изменения основных таксационных характеристик лесного фонда Подмосковной Мещеры в первой четверти XXI века / А. В. Лебедев, В. П. Захаров, С. А. Коротков // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 52–68. – Библиогр.: с. 63–68 (32 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/4>.

Поступила 14.01.2026. Пересмотрена 11.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Changes in the Main Forest Inventory Characteristics of the Forest Fund in the Moscow Meshchera Region during the First Quarter of the 21st Century

Aleksandr V. Lebedev¹ ✉, alebedev@rgau-msha.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

Vladimir P. Zakharov², zakharov@forest.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-0176-6053>

Sergey A. Korotkov^{3,4}, skorotkov-71@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2754-6014>

¹*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, 127434, Russian Federation*

²*Mosoblles, Rublevo-Uspenskoe av., 1 km, b. 1A, Razdory village, Odintsovo district, Moscow region, 143082, Russian Federation*

³*Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya st, 1, Mytischki, Moscow region, 141005, Russian Federation*

⁴*Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st., 1, Uspenskoye village, Odintsovo district, Moscow region, 143030, Russian Federation*

Abstract

The article presents the results of an analysis of the dynamics of the main forest inventory characteristics of forest stands in the Moscow Region Meshchera for the period 2000–2020, based on forest management data from two revision periods (2000–2002 and 2018–2020). The object of the study was the forest fund lands of the Yegoryevskoye, Noginskoye, Orekhovo-Zuyevskoye, Shaturskoye, and part of the Vinogradovskoye forest districts, with a total area of 433.2 thousand hectares. The methodology included a comparison of species composition, age structure, distribution by forest types, as well as the calculation of average values for age, site index (bonitet), stocking density, timber stock, and annual increment for the main forest-forming species (pine, spruce, birch, aspen). It was revealed that over two decades, significant structural changes occurred: the total forested area increased by 9%; however, the proportion of coniferous stands decreased from 61% to 49% due to a sharp reduction in spruce forest areas (from 10% to 4%). Simultaneously, there is a significant increase in the share of birch forests (from 35% to 44%). A trend of forest stand aging (average age increased from 61 to 68 years) and a strong unevenness in their age distribution were identified. The main drivers of these changes were the aftermath of a massive outbreak of the European spruce bark beetle (2012–2015), which led to large-scale sanitary logging in spruce forests, and forest fires. Active natural regeneration of birch is occurring on the disturbed areas. The obtained data indicate a deviation of forest dynamics from natural successional trends and the formation of derivative deciduous communities. Based on the results, adaptive forest management measures aimed at forming sustainable uneven-aged and mixed stands are proposed.

Keywords: *Moscow Region Meshchera, forest dynamics, forest inventory characteristics, species composition, age structure, forest fund, forest productivity*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Lebedev A. V., Zakharov V. P., Korotkov S. A. (2026). Changes in the Main Forest Inventory Characteristics of the Forest Fund in the Moscow Meshchera Region during the First Quarter of the 21st Century. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 52–68 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/4>.

Received 14.01.2026.

Revised 11.02.2026.

Accepted 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Деятельность человека на протяжении многих сотен лет влияет на лесистость территорий, состав и структуру лесов [1–4]. Одним из регионов в центральной России, где на протяжении нескольких столетий ярко прослеживается антропогенная трансформация и фрагментация лесного покрова,

является Подмоскowie [5–7]. В разные исторические периоды основными факторами, формирующими облик лесов региона, были интенсивные рубки, проводимые с целью расширения сельскохозяйственных угодий и заготовки древесины, игравшей важную роль в развитии промышленности, лесные пожары, болезни и вредители леса, интенсивное рекреационное

лесоупользование и развитие инфраструктуры населенных пунктов. В последние десятилетия в качестве главных причин, определяющих лесистость, породный состав, структуру и продуктивность лесов, выделяют особенности целевого назначения лесов Московской области, изменения климата, гибель древостоев в результате массовых вспышек болезней и вредителей леса, интенсивное негативное воздействие рекреантов и инфраструктурных объектов на компоненты лесных насаждений [6; 8-13].

Леса Подмосковья относятся к зоне хвойно-широколиственных лесов [14], но сочетание климатических факторов, специфики почвообразовательного процесса, особенностей флоры позволяют выделить уникальную территорию в Московской области – Мещерскую низменность. Ее природа близка к таежному типу, где характерными растительными сообществами являются сосново-еловые леса с хорошо развитым травяно-кустарничковым ярусом, сформированным черникой [15]. На фоне воздействия антропогенных факторов и климатических изменений особого внимания заслуживают вопросы, связанные с естественной динамикой лесных сообществ. Литературные данные показывают, что за последние 60-70 лет по породному составу характер лесов ближнего Подмосковья леса становится менее бореальным. Отмечается мезофитизация, а местами и неморализация растительного покрова [16-17].

Изменение в составе лесов можно рассматривать в двух аспектах: историко-геологический аспект подразумевает смены ареала и расселение растений под действием меняющегося климата и рельефа; другой тип изменений, связанный с взаимоотношениями различных древесных пород и их реакцией на экологические факторы, происходит в течение жизни одного поколения древостоя [6]. Отдельные древесные породы показывают разную степень устойчивости к новым условиям природно-антропогенной среды [18-19].

В Восточном Подмосковье прогнозируется снижение роли сосны, поскольку, за исключением лишь крайне сухих и влажных лесорастительных условий, она естественным путём не возобновляется и сменяется елью [20]. Наблюдения на западной границе Мещёры показали, что происходит смена сложных ельников широколиственными сообществами [21]. Модельные оценки показывают, что для климатических сценариев SSP3-RCP7.0 и SSP5-RCP8.5 ко второй половине XXI века в уязвимом положении окажутся ельники юго-восточной части Московской области [13]. Таким образом, в условиях потепления климата, изменения гидрологических условий основным возможным направлением в смене породного состава лесов станет постепенное формирование древостоев с преобладанием широколиственных пород.

Ранее проводимые исследования показывают, что в отсутствие внешних воздействий восстановительные процессы идут в направлении восстановления коренных типов леса: в лесах флювиогляциальной равнины – черничных и кисличных ельников, в лесах моренной равнины – сложных ельников с липой ¹, наряду с которыми будут существовать длительно-производные липняки. В лесах древнеаллювиальной равнины и речных террас на место сосняков постепенно приходят берёзовые, липовые и берёзовые леса, в которых необходимы специальные меры по содействию естественному возобновлению сосны ² [20]. Однако естественный ход динамики процессов в лесах нарушается как активным хозяйственным воздействием на лесные массивы, так и различными природными факторами. В частности, Восточное Подмосковье является территорией, наиболее подверженной рискам лесных пожаров. К примеру, на Ногинское и Орехово-Зуевское лесничества за последние десятилетия приходится большинство регистрируемых в границах государственного лесного фонда Московской области возгораний. Повсеместное повреждение насаждений с участием ели отмечено в результате вспышки численности

¹ Леса Восточного Подмосковья. – Москва: Наука, 1979. – 184 с.

² Орлова М.А. Естественное возобновление в лесах Восточного Подмосковья // Лесоведение. – 1981. – № 2. – С. 52-59.

короеда типографа 2012-2015 годов, за которой последовал рост площадей сплошных и выборочных санитарных рубок, отбросивших лесовосстановительную динамику на начальные стадии. За период 2013-2017 гг. в результате санитарно-оздоровительных мероприятий на территории московского региона было заготовлено 10372,6 тыс. м³ ликвидной древесины [22].

Для таких регионов как Москва и Московская область, имеет большое значение взаимоотношение лес–город [23-26]. В условиях сильной фрагментированности лесного покрова и интенсивных рекреационных воздействий, изменения климата важно понимать, какими будут леса и как они будут выполнять свои экосистемные, защитные и ресурсные функции. *Цель исследования* – изучить изменений основных таксационных показателей лесного фонда Подмосковной Мещеры на фоне воздействия антропогенных и природных факторов.

Материалы и методы

Объекты исследования. В исследовании рассматриваются земли лесного фонда на территории Мещёрской низменности в административных границах Московской области. Район характеризуется равнинным рельефом, сформированным в основном четвертичными отложениями, с преобладанием низменных ландшафтов, слабовыраженными формами холмов и множеством озёр ледникового происхождения. Природа Окско-Клязьминского междуречья демонстрирует ряд особенностей, сближающих её с таёжными лесами, несмотря на территориальное расположение в зоне широколиственных и смешанных лесов.

Климат района – умеренно-континентальный. Характеризуется умеренно холодной зимой, тёплым летом и достаточным и устойчивым увлажнением. Климатические особенности обусловлены влиянием континентальных воздушных масс, способствующих формированию условий, характерных для более северных территорий.

³ Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. – Москва: Наука, 1973. – 204 с.

⁴ Исаченко Т.И., Юрковская Т.К. Основные типы сочетаний растительности Мещеры и отражение их на карте // Геоботаническое

Средняя температура января составляет около –10 °С, а июля — примерно +18 °С, что соответствует параметрам климата бореальной зоны. Такое температурное распределение благоприятствует распространению насаждений с преобладанием хвойных пород деревьев, таких как сосна обыкновенная и ель европейская.

Согласно лесорастительному районированию ³, вся территория Московской области находится в южной полосе подзоны смешанных лесов. Окско-Клязьменское междуречье включает в себя несколько районов [15]:

– район северо-западной Подмосковной Мещеры с преобладанием сложных ельников зонального типа, реже – сложных сосняков;

– район Подмосковной Мещеры с преобладанием хвойных лесов бореального типа и значительным распространением заболоченных земель. В составе лесов преобладают бореальные сосняки с елью. Встречаются субнеморальные ельники, сложные ельники с липой, реже – с дубом, сложные сосняки с липой, заболоченные березняки, верховые и низинные болота;

– район центрально-болотной Мещеры с преобладанием хвойных лесов бореального типа и большим количеством озёр и болот;

– район Егорьевского плато с преобладанием сложных ельников, главным образом с липой.

Породный состав лесов отражает сходство с таёжной зоной. Лесообразующие породы представлены преимущественно хвойными насаждениями, особенно сосняками, образующими большие площади зеленомошной группы. Хвойные леса занимают значительную долю территории Мещёры, хотя присутствуют и участки смешанного типа с участием берёз повислой и пушистой, а также осины. Широколиственные породы, такие как дуб, встречаются значительно реже и ограничены небольшими участками, чаще всего приуроченными к долинам рек ⁴.

Важную роль в формировании лесной структуры играют почва и гидрологический режим. Территория входит в подзону дерново-подзолистых почв подзолистой зоны, отличаясь преобладанием песков и супесей ⁵. Почвы формируются преимущественно на древнеледниковых равнинах и низких водораздельных пространствах, характеризующихся наличием переувлажнённых

картографирование. – 1973. – № 1973. – С. 3-15. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42648919>

⁵ Курганова Е.В. Плодородие и продуктивность почв Московской области. – Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова (Издательский Дом (Типография), 2002. – 320 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26825378>

участков, торфа и слабобразвитых песчаных отложений. Образование торфяных и болотистых почв связано с долгими периодами переувлажнения, низким уровнем стока и бедностью питательных веществ.

Методика исследования. В исследовании проанализированы таксационные характеристики расположенных в границах Подмосковной Мещёры Егорьевского, Ногинского, Орехово-Зуевского, Шатурского и части Виноградовского лесничеств, общая площадь земель, покрытых лесной растительностью которых составляет 433,2 тыс. га (24,77% всей Московской области). Всего проанализированы данные 153780 таксационных выделов по материалам лесоустройства двух последних ревизионных периодов – 2000–2002 и 2018–2020 годов.

Определено процентное соотношение покрытых лесом площадей, занятых насаждениями с преобладанием основных лесобразующих пород (сосна, ель, береза, осина) и рассмотрено распределение насаждений, представленных различными типами леса и относящихся к различным классам возраста. Для каждой из основных древесных пород рассчитаны средний возраст, средний класс бонитета, средняя относительная полнота, средний запас древесины и средний годовой прирост по запасу как средневзвешенные величины [27]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

где $\bar{x}$ – среднее значение таксационного показателя, x_i – значение таксационного показателя на i -ом выделе, S_i – площадь i выдела, га.

Изменчивость таксационных показателей оценена с использованием среднеквадратического отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n S_i}},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение таксационного показателя, $\bar{x}$ – среднее значение таксационного показателя, x_i – значение

таксационного показателя на i -ом выделе, S_i – площадь i выдела, га.

Все расчеты и визуализация данных проведены с использованием Microsoft Office Excel. Везде для средних после «±» приведены значения среднеквадратических отклонений.

Результаты и обсуждение

За два десятилетия лесопокрытая площадь в Подмосковной Мещере увеличилась с 408 до 446 тыс. га (на 38 тыс. га или 9%). Изменение соотношения древесных пород в насаждениях представляет собой динамический процесс, обусловленный взаимодействием природных факторов и антропогенного воздействия. Как отмечалось выше, одними из главных факторов являются вспышки численности вредных организмов (в первую очередь, короеда типографа и непарного шелкопряда), воздействие пожаров, развитие городской агломерации и развитие транспортной инфраструктуры. Доля лесопокрытых площадей и запасов древесины по преобладающим породам в различные ревизионные периоды показана на рисунках 1 и 2 соответственно. Обобщенные данные учета лесного фонда показывают сокращение лесопокрытых площадей с сосновыми древостоями с 51 до 45% (или с 208 до 203 тыс. га), с еловыми – с 10 до 4% (или с 40 до 17 тыс. га). При снижении доли площадей под хвойными породами наблюдается увеличение доли площадей под березовыми древостоями с 35 до 44% (или с 143 до 196 тыс. га) и прочими породами (ольха серая и черная, липа, дуб, вяз и др.) с 1 до 4% (или с 5 до 18 тыс. га). Доля площадей с преобладанием осины в древостоях осталась не измененной и составила 3% (около 13 тыс. га).

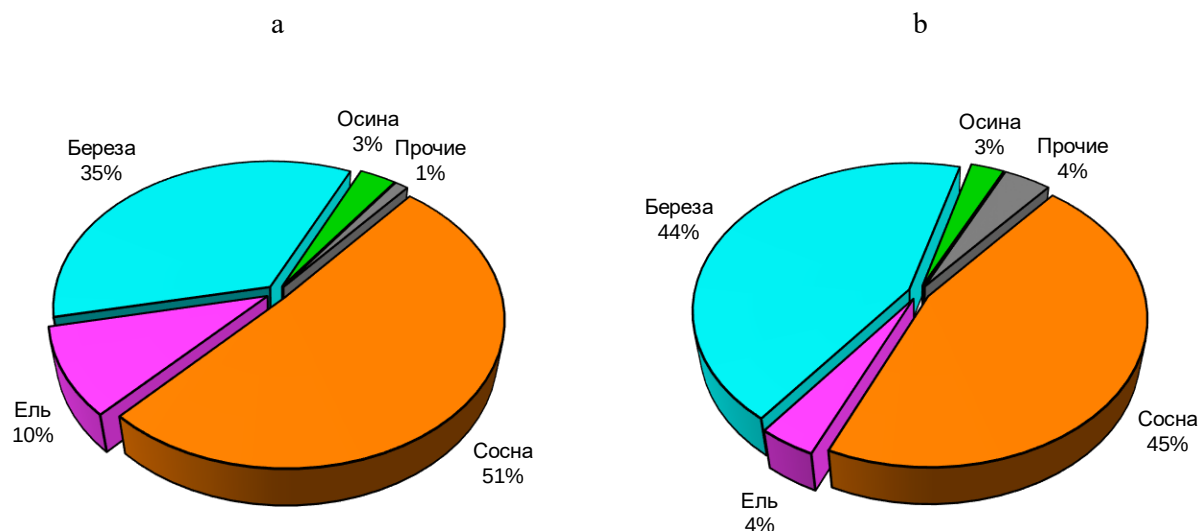


Рисунок 1. Изменение соотношения лесопокрытых площадей по преобладающим породам:
а) 2000–2002 годы, б) 2018–2020 годы
Figure 1. Change in the ratio of forested areas by dominant tree species: а) 2000–2002, б) 2018–2020

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors composition

Соотношение запасов показывает повышение доли древостоев с преобладанием сосны с 52 до 56% (или с 37 до 51 млн. м³), березы с 30 до 33% (или с 22 до 30 млн. м³), прочих пород с 3 до 4% (или с 2 до 3 млн. м³). Для древостоев с преобладанием ели наблюдается снижение доли в общем запасе с 12 до 4% (или с 9 до 4 млн. м³). Совместный анализ соотношения площадей и запасов по преобладающим древесным породам позволяет выделить следующие основные тенденции в породном составе лесов Подмосковной Мещеры: 1) сокращение площадей с преобладанием хвойных пород (особенно ельников), которое для сосновых насаждений сопровождается повышением среднего запаса на 1 га; 2) увеличение в лесном фонде доли лиственных пород как по площади, так и по запасу древесины.

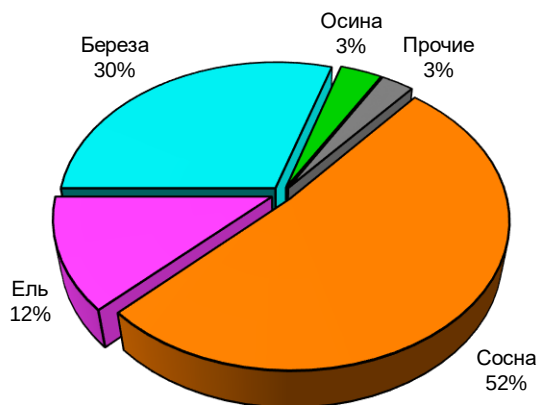
Распределение насаждений по классам возраста по отдельным преобладающим породам позволяет оценивать эффективность ведения лесного хозяйства. Визуальный анализ показывает, что для всех основных преобладающих в составе насаждений лесообразующих пород распределения резко отличаются от равномерного (рисунок 3), что

не обеспечивает равномерности планирования хозяйственных мероприятий и лесопользования в будущем. В целом для лесов Подмосковной Мещеры наблюдается негативная тенденция старения насаждений со сменой спелых и перестойных древостоев с преобладанием хвойных пород на березовые молодняки.

В насаждениях с преобладанием сосны класс возраста с наибольшими площадями за два десятилетия сместился с интервала 61–80 (65 тыс. га) до 81–100 лет (68 тыс. га). На землях лесного фонда Подмосковной Мещеры сосновые молодняки и перестойные насаждения занимают наименьшую площадь среди всех возрастных периодов. На структуру ряда распределения площадей еловых насаждений за 20-ти летний период повлияли засухи, вспышки короеда-типографа, усыхание древостоев и проведение сплошных санитарных рубок. Это привело к значительно снижению площадей в диапазоне возрастов от 41 до 100 лет. На местах санитарных рубок происходило активное формирование березового молодняка, что привело к значительному увеличению площадей, занятых березовыми насаждениями. За рассматриваемый

временной промежуток площадь насаждений с преобладанием березы возрастом 1-10 лет возросла с 4 до 32 тыс. га. Для насаждений с преобладанием

а



осины произошло смещение класса возраста с наибольшими площадями с интервала 51-60 (3,5 тыс. га) до 71-80 лет (3,8 тыс. га).

б

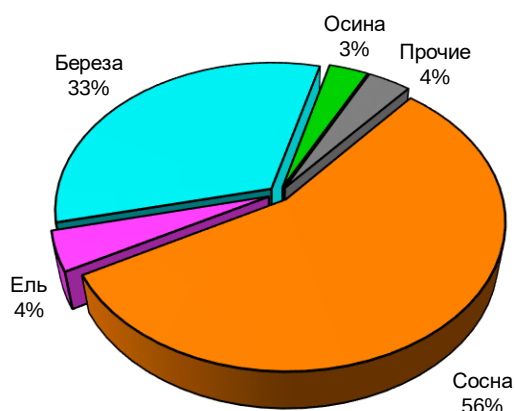


Рисунок 2. Изменение соотношения запасов древесины в лесных насаждениях по преобладающим породам:
а) 2000-2002 годы, б) 2018-2020 годы

Figure 2. Change in the ratio of timber stock in forest stands by dominant tree species: a) 2000-2002, b) 2018-2020

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors composition

При планировании и ведении лесохозяйственных мероприятий в Европейской части России используются классификация по типам леса ⁶ и типам лесорастительных условий ⁷. Понимание многообразия и динамики лесорастительных условий обеспечивает эффективное управление лесными ресурсами, способствует сохранению биоразнообразия и повышению экологической устойчивости лесных территорий. В то же время для зоны хвойно-

широколиственных лесов в условиях интенсивного антропогенного воздействия возможно введение определенных корректировок данной типологии. Ещё Г.Ф. Морозов указывал, что тип насаждений необходимо рассматривать как лесоводственно-географическое понятие и что группировать типы можно различно, в зависимости от научных и хозяйственных целей.

⁶ Сукачев В.Н. Краткое руководство к исследованию типов леса. – М.: Новая деревня, 1927. – 150 с.

⁷ Погребняк П.С. Основы лесной типологии. – Киев: АН УССР, 1955. – 456 с.

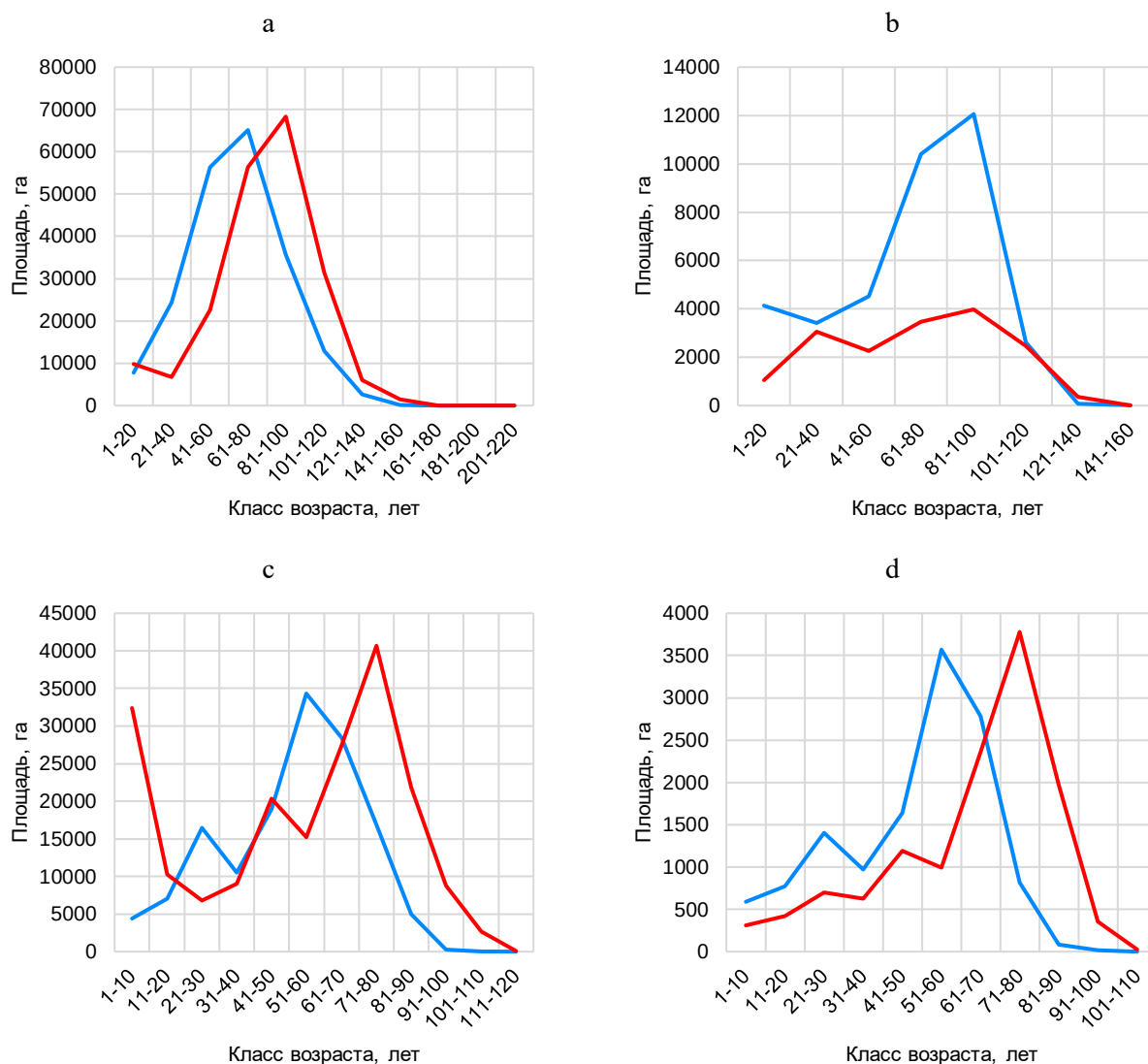


Рисунок 3. Распределение лесопокрытых площадей по классам возраста (синяя линия – 2000-2002 годы, красная линия – 2018-2020 годы) для насаждений с преобладанием: а) сосны, б) ели, в) березы, г) осины
 Figure 3. Distribution of forested areas by age classes (blue line – 2000-2002, red line – 2018-2020) for stands dominated by: a) pine, b) spruce, c) birch, d) aspen

Источник: собственная композиция авторов
 Source: authors composition

В насаждениях с преобладанием сосны и осины за два десятилетия не произошло значительных изменений в структуре распределения площадей по типам леса (рисунок 4). Наибольшие площади с сосновыми древостоями в условиях Подмосковной Мещеры имеют такие типы леса, как сосняки черничные мелкотравные (более 115 тыс. га) и сосняки сложные мелкотравные (более 55 тыс. га), с осинниками – ельники черничные широколиственные (более 7,5 тыс. га), сосняки черничные мелкотравные (около 2 тыс. га) и ельники сложные широколиственные (около 1 тыс. га). За счет

проведения санитарных рубок произошло уменьшение площадей более чем в два раза насаждений с преобладанием ели в таких типах леса как ельники черничные широколиственные (с 20 до 8 тыс. га), сосняки черничные мелкотравные (с 10 до 4 тыс. га) и ельники сложные широколиственные (с 5 до 3 тыс. га). В этих типах леса отмечено значительное увеличение площадей с преобладанием вторичных березовых насаждений.

Итоговые сведения о состоянии и производительности лесов Подмосковной Мещеры (средние возраст, класс бонитета, полнота, запас

древесины и годовой прирост по запасу) по преобладающим породам представлены в таблице. За учетные период произошло заметное старение лесов, особенно сосняков (средний возраст увеличился с 67 до 81 года) и для осинников (средний возраст увеличился с 50 до 65 лет). Проведение на значительных площадях в спелых и перестойных ельниках санитарных рубок и формирование на этих участках березняков привели к тому, что средний возраст древостоев с преобладанием ели (начало периода – 69 лет, конец периода – 70 лет) и березы (начало периода – 53 года, конец периода – 55 лет) за два десятилетия практически не изменился. В целом по лесному фонду Подмосковной Мещеры средний возраст повысился с 61 до 68 лет.

Статистически достоверного изменения средних классов бонитета и относительных полнот насаждений на землях лесного фонда Подмосковной Мещеры за рассматриваемый период не произошло. Древостои в среднем можно считать высокопродуктивными, преобладают I-II классы бонитета. Средняя полнота находится в диапазоне 0,6-0,7 ед., преобладают среднеполнотные насаждения. По всем насаждениям на землях лесного фонда можно отметить повышение среднего запаса древесины с 179 до 204 м³/га. Вместе с этим статистически достоверного изменения среднего годового прироста запаса не произошло, он составил около 2,9 м³/га. Только для древостоев с преобладанием сосны наблюдается повышение среднего запаса с 185 до 251 м³/га с одновременным увеличением среднего годового прироста с 2,8 до 3,1 м³/га. В древостоях с преобладанием ели (около 240 м³/га) и березы (около 150 м³/га) средний запас остался без изменений со снижением среднего годового прироста на 5 и 10% соответственно. Древостои с преобладанием осины хотя и демонстрируют повышение среднего запаса с 206 до

240 м³/га, но ввиду их старения произошло падение среднего годового прироста на 10% с 4,1 до 3,7 м³/га. В то же время для лесов Московского региона важность древесного потенциала лесов уступает их средообразующей роли – климаторегулирующей, водо- и почвозащитной, санитарно-гигиенической, рекреационной, а также как основы поддержания естественного биологического разнообразия. Это выводит на первый план вопросы устойчивости насаждений.

Таким образом, для лесов Восточного Подмосковья отмечены изменения, характерные для всего центрального региона с учётом географических и социально-экономических особенностей территории [29-30]. Анализ лесоустроительных данных позволяет выделить основные направления возрастной и породной динамики насаждений, которые необходимо учитывать при планировании хозяйственных мероприятий:

- общее увеличение доли лиственных насаждений, в первую очередь с преобладанием берёзы;
- увеличение площадей участков, занятых перестойным березняками и осинниками, что даёт основания предположить необходимость в самом ближайшем будущем решения проблем, связанных с распадом данных насаждений;
- увеличение берёзовых молодняков в результате зарастания вырубок и гарей;
- сокращение площадей ельников за счёт гибели в результате повреждения короедом типографом (в первую очередь, спелых и перестойных и в наиболее продуктивных типах лесорастительных условий);
- доля сосняков изменилась незначительно за счёт компенсации гибели насаждений созданием сосновых культур.

Естественные науки и лес

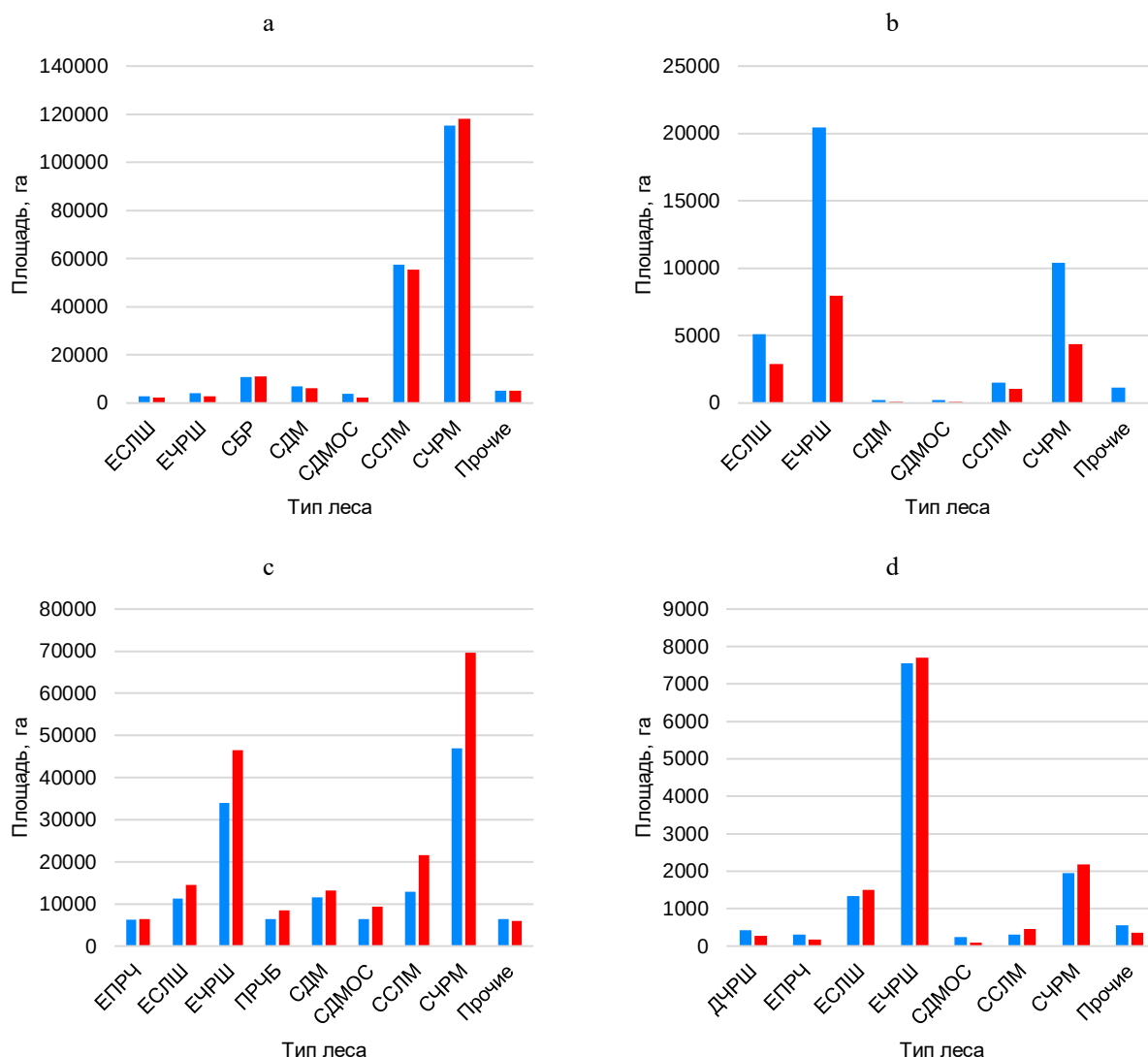


Рисунок 4. Распределение лесопокрытых площадей по типам леса для насаждений с преобладанием: а) сосны, б) ели, в) березы, г) осины (ДЧРШ – дубняк черничный широколиственный, ЕПРЧ – ельник приручевый, ЕСЛШ – ельник сложный широколиственный, ЕЧРШ – ельник черничный широколиственный, ПРЧБ – березняк приручевый, СБР – сосняк брусничный, СДМ – сосняк долгомошный, СДМОС – сосняк долгомошный осушенный, ССЛМ – сосняк сложный мелколиственный, СЧРМ – сосняк черничный мелколиственный)

Figure 4. Distribution of forested areas by forest types for stands dominated by: а) pine, б) spruce, в) birch, г) aspen (ДЧРШ – bilberry oak forest with tall herbs, ЕПРЧ – spruce forest along streams, ЕСЛШ – complex spruce forest with tall herbs, ЕЧРШ – bilberry spruce forest with tall herbs, ПРЧБ – birch forest along streams, СБР – lingonberry pine forest, СДМ – long-moss pine forest, СДМОС – drained long-moss pine forest, ССЛМ – complex pine forest with small herbs, СЧРМ – bilberry pine forest with small herbs).

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors composition

Изменение производительности лесов Подмосковной Мещеры по преобладающим породам

Таблица

Table

Change in the yield of forests in the Moscow Region Meshchera by dominant tree species

Показатель Indicator	Год учета Survey Year		Изменение средних Change in Mean
	2000-2002	2018-2020	
Сосна Pine			

Естественные науки и лес

Средний возраст, лет Average age, years	67 ± 25	81 ± 28	+14 (+20,9%)
Средний класс бонитета Average site index (bonitet class)	1,28 ± 0,56	1,25 ± 0,78	-0,03 (-2,3%)
Средняя относительная полнота, ед. Average relative stocking density, units	0,69 ± 0,11	0,64 ± 0,15	-0,05 (-7,2%)
Средний запас древесины, м³/га Average timber stock, m³/ha	185 ± 112	251 ± 82	+66 (+35,7%)
Средний годовой прирост по запасу, м³/га Average annual volume increment, m³/ha	2,78 ± 1,77	3,10 ± 1,04	+0,32 (+11,5%)
Ель Spruce			
Средний возраст, лет Average age, years	69 ± 29	70 ± 37	+1 (+1,4%)
Средний класс бонитета Average site index (bonitet class)	1,29 ± 0,49	1,54 ± 0,79	+0,25 (+19,4%)
Средняя относительная полнота, ед. Average relative stocking density, units	0,66 ± 0,11	0,61 ± 0,16	-0,05 (-7,6%)
Средний запас древесины, м³/га Average timber stock, m³/ha	240 ± 128	236 ± 111	-4 (-1,7%)
Средний годовой прирост по запасу, м³/га Average annual volume increment, m³/ha	3,48 ± 1,52	3,38 ± 1,27	-0,1 (-2,9%)
Береза Birch			
Средний возраст, лет Average age, years	53 ± 20	55 ± 29	+2 (+3,8%)
Средний класс бонитета Average site index (bonitet class)	1,65 ± 0,78	1,72 ± 0,74	+0,07 (+4,2%)
Средняя относительная полнота, ед. Average relative stocking density, units	0,70 ± 0,11	0,66 ± 0,12	-0,04 (-5,7%)
Средний запас древесины, м³/га Average timber stock, m³/ha	154 ± 85	152 ± 83	-2 (-1,3%)
Средний годовой прирост по запасу, м³/га Average annual volume increment, m³/ha	2,90 ± 1,32	2,75 ± 0,80	-0,15 (-5,2%)
Осина Aspen			
Средний возраст, лет Average age, years	50 ± 19	65 ± 22	+15 (+30%)
Средний класс бонитета Average site index (bonitet class)	1,31 ± 0,50	1,30 ± 0,55	-0,01 (-0,8%)
Средняя относительная полнота, ед. Average relative stocking density, units	0,72 ± 0,09	0,68 ± 0,11	-0,04 (-5,6%)
Средний запас древесины, м³/га Average timber stock, m³/ha	206 ± 88	240 ± 78	+34 (+16,5%)
Средний годовой прирост по запасу, м³/га Average annual volume increment, m³/ha	4,09 ± 1,20	3,69 ± 0,90	-0,4 (-9,8%)
Итого по всем породам Total for all species			
Средний возраст, лет Average age, years	61 ± 24	68 ± 31	+7 (+11,5%)
Средний класс бонитета Average site index (bonitet class)	1,44 ± 0,68	1,50 ± 0,80	+0,06 (+4,2%)
Средняя относительная полнота, ед. Average relative stocking density, units	0,69 ± 0,11	0,65 ± 0,14	-0,04 (-5,8%)
Средний запас древесины, м³/га Average timber stock, m³/ha	179 ± 106	204 ± 96	+25 (+14%)
Средний годовой прирост по запасу, м³/га Average annual volume increment, m³/ha	2,92 ± 1,59	2,99 ± 0,98	+0,07 (+2,4%)

Источник: собственные вычисления автора
Source: author's calculation

Формирования устойчивых и эстетически привлекательных насаждений можно добиться за счет проведения системы лесохозяйственных мероприятий [30-32]. Ключевым элементом управления лесами должны стать рубки ухода, включая осветления, прочистки и прореживания, направленные на формирование оптимального состава и густоты древостоев как искусственного, так и естественного происхождения, и создание лучших условий для деревьев будущего. Так как для возобновления ели достаточно прогалин размерами порядка 0,01 га, выборочные рубки низкой интенсивности приведут к формированию разновозрастных насаждений.

Наиболее успешное возобновление сосны как светолюбивого пионерного вида возможно лишь на вырубках с неразвитым напочвенным покровом, протяженность которых с севера на юг более 40-50 м или под пологом низкополнотных сосняков в типах лесорастительных условий A_1-A_2 с неразвитым подлесочным ярусом. В более богатых и влажных местообитаниях целесообразно создание лесных культур с обязательным проведением всего комплекса мероприятий по уходу.

С целью снижения горимости хвойных лесных культур в большинстве типов лесорастительных условий возможно формирование лиственных опушек по границам с не покрытыми лесом земельными участками (земли сельскохозяйственного назначения, населенных пунктов и т.п.), активно посещаемыми с целью рекреации территориями, авто- и железными дорогами. Для этих целей на этапах отводов рубок должны планироваться участки, ориентированные на естественное лесовосстановление.

Для лиственных насаждений старших классов возраста необходимо планирование как проходных рубок, так и выборочных рубок (в том числе, группово-выборочных) в спелых и перестойных насаждениях, что позволит избежать распада древостоев вследствие повреждения

болезнями, вредными организмами и под влиянием аномальных погодных явлений. Доля насаждений с участием широколиственных пород в Подмосквой Мещёре незначительна, поэтому необходимо сохранение при любых видах рубок экземпляров дуба, липы, вяза.

Приведённые меры будут способствовать формированию более равномерной возрастной и породной структуры насаждений, удовлетворения разнообразных потребностей населения и поддержания высокого уровня биологического разнообразия.

Заключение

Анализ динамики лесов Подмосквой Мещеры за период 2000–2020 гг. выявил глубокие структурные изменения, главной чертой которых является интенсивная смена породного состава. Под воздействием комплекса природных и антропогенных факторов произошло резкое сокращение доли ельников и значительное увеличение площадей, занятых производными березняками. Одновременно наблюдается старение древостоев основных лесобразующих пород и нарушение равномерности их возрастной структуры, что создает риски для устойчивости будущего лесного покрова региона.

Сложившиеся тенденции свидетельствуют об отклонении естественных восстановительных процессов от ожидаемого формирования коренных хвойных сообществ. В этих условиях для поддержания экосистемных функций лесов необходима целенаправленная адаптация системы лесного хозяйства. Ключевыми элементами должны стать: комплекс рубок ухода для формирования целевой структуры насаждений, меры по содействию естественному возобновлению хвойных пород, создание лесных культур, лесозащитные мероприятия, а также мероприятия по повышению пожарной устойчивости насаждений.

Список литературы

1. Marengo G., Anselmetto N., Barberis D., Lombardi G., Lonati M., Garbarino M. Land-use legacy drives post-abandonment forest structure and understory in the western Alps. *Landscape and Urban Planning*. 2025; 259: 105357. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105357>
2. Chernenkova T., Belyaeva N., Maslov A., Titovets A., Novikov A., Kotlov I., Arkhipova M., Popchenko M. Long-Term Changes in the Structural and Functional Composition of Spruce Forests in the Center of the East European Plain. *Forests*. 2025; 16(10): 1526. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f16101526>
3. Audinot T., Wernsdörfer H., Bontemps J.D. Ancient Forest statistics provide centennial perspective over the status and dynamics of forest area in France. *Annals of Forest Science*. 2020; 77: 77. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00987-5>

4. Aakala T., Kulha N., Kuuluvainen T. Human impact on forests in early twentieth century Finland. *Landscape Ecology*. 2023; 38: 2417-2431. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01688-w>
5. Chernenkova T., Belyaeva N., Novikov A., Kotlov I. Driving Factors of Forest Typological Diversity in the Moscow Region. *Forests*. 2024; 15(10): 1683. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15101683>
6. Коротков С.А. Смена состава древостоев и устойчивость защитных лесов центральной части Русской равнины. – Москва: АНО «Доблесть эпох», 2023. – 168 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52797028>
7. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Динамика показателей земель лесного фонда и санитарного состояния лесов Московской области // *Орошаемое земледелие*. – 2024. – № 2(45). – С. 60-67. – DOI: <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2024-2-10>
8. Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Каганов В.В. Экосистемные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // *Лесоведение*. – 2021. – № 6. – С. 581-592. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114821060115>
9. Балашкевич Ю.А., Балухта Л.П. К вопросу распространения основных видов болезней в лесах Центрального федерального округа // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2025. – № 253. – С. 168-177. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.253.168-177>
10. Моисеев Н.А., Сурканов О.И. Проблемы лесов Подмосковья и альтернативы их решения // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. – 2014. – Т. 18, № 3. – С. 141-145. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21638395>
11. Еременко Н.П., Назаренко Е.Б., Гамсахурдия О.В. Проблемы лесов Подмосковья // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. – 2019. – № 3. – С. 15-19. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38217526>
12. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Потенциальная древесная продуктивность лесов Московской обл. в условиях изменения климата // *Лесохозяйственная информация*. – 2025. – № 1. – С. 36-48. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04>
13. Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Оценка реакции популяций *Picea abies* (L.) Н. Karst. Московской области на изменения климата // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. – 2025. – № 3(80). – С. 82-92. – DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2025.80.3.009>
14. Маслов А.А. Биологическое разнообразие коренных типов леса в заповедных лесных участках Московского региона // *Лесоведение*. – 2022. – № 6. – С. 631-642. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114822060067>
15. Сулова Е.Г. Леса Московской области // *Экосистемы: экология и динамика*. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 119-190. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38470777>
16. Киселева В.В. Динамика типов леса и типов насаждений национального парка "Лосиный остров" // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. – 2019. – Т. 23, № 2. – С. 20-28. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-20-28>
17. Беляева Н.Г., Черненькова Т.В., Маслов А.А. Динамика старовозрастных еловых лесов Московской области // *Региональные проблемы*. – 2025. – Т. 28, № 2. – С. 39-43. – DOI: <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2025-28-2-39-43>
18. Freund S.M., Newingham B.A., Chambers J.C., Urza A.K., Roundy B.A., Cushman J.H. Plant functional groups and species contribute to ecological resilience a decade after woodland expansion treatments. *Ecosphere*. 2021; 12(1): e03325. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3325>
19. Dyderski M.K., Paż-Dyderska S., Jagodziński A.M., Puchałka R. Shifts in native tree species distributions in Europe under climate change. *Journal of Environmental Management*. 2025; 373: 123504. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123504>
20. Chernenkova T., Kotlov I., Belyaeva N., Suslova E. Spatiotemporal Modeling of Coniferous Forests Dynamics along the Southern Edge of Their Range in the Central Russian Plain. *Remote Sensing*. 2021; 13(10): 1886. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13101886>

21. Kiseleva V., Stonozhenko L., Korotkov S. The dynamics of forest species composition in the Eastern Moscow Region. *Folia Forestalia Polonica, Series A*. 2020; 62(2): 53-67. – DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2020-0007>.
22. Захаров В.П., Коротков С.А. Динамика лесов Восточного Подмосквья и их использование // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича: Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 144-149. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74459762>.
23. Kotlov I., Chernenkova T., Belyaeva N. Urban forests of Moscow: typological diversity, succession status, and fragmentation assessment. *Landscape Ecology*. 2023; 38: 3767–3789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01788-7>.
24. Лежнев Д.В., Меняева В.А. Состояние живого напочвенного покрова в насаждениях *Pinus sylvestris* L. национального парка «Лосиный остров» // Тимирязевский биологический журнал. – 2025. – № 1. – С. 202531104. – DOI: <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-1-1-04>.
25. Мучник Е.Э., Тихонова Е.В., Аверченков И.М., Неслуховский И.Ю., Захаринский А.Ю., Комаров А.В., Кожин М.Н., Семенцова М.В. Валуевский лесопарк как перспективная особо охраняемая природная территория в пределах Новой Москвы // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2020. – № 8. – С. 90-103. – DOI: <https://doi.org/10.17076/bg1217>.
26. Манджи О., Ярославцев А.М., Васенев И.И. Оценка антропогенного воздействия на лесные экосистемы города Москвы // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2023. – № 6(34). – С. 1. – DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.34.2>.
27. Суслов А.В., Нагимов З.Я., Корелина А.А. Организация мониторинга насаждений в лесопарках города Екатеринбурга с применением математико-статистических методов // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 6. – С. 35-41. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37638>.
28. Кузнецова Н.Ф., Сауткина М.Ю. Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе // Лесохозяйственная информация. – 2019. – № 2. – С. 25-45. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03>.
29. Майорова Е.И., Шешнева В.Д. Городские леса Москвы в свете изменений Лесного кодекса Российской Федерации 2023 года // Лесной вестник. *Forestry Bulletin*. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 87-95. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-3-87-95>.
30. Abate D., Botequim B., Marques S., Lagoa S., Hernández J.G., Hengeveld G., Hoogstra-Klein M., Borges J.G. Recreational and aesthetic values of forest landscapes (RAFL): Quantifying management impacts and trade-offs with provisioning and regulatory ecosystem services. *Forest Ecosystems*. 2025; 13: 100318. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2025.100318>.
31. López-Rodríguez A., Hernández-Jiménez V. Sustainable Forest, Beautiful Forest, Well-Managed Forest: Attitudes towards Land Management and Their Influence on the Perception of a Mediterranean Agroforestry Landscape. *Land*. 2022; 11(8): 1260. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land11081260>.
32. de Jesus França L.C., Júnior F.W.A., e Silva C.S.J., Monti C.A.U., Ferreira T.C., de Oliveira Santana C.J., Gomide L.R. Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review. *Trees, Forests and People*. 2022; 8: 100275. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100275>.

References

1. Marengo G., Anselmetto N., Barberis D., Lombardi G., Lonati M., Garbarino M. Land-use legacy drives post-abandonment forest structure and understory in the western Alps. *Landscape and Urban Planning*. 2025; 259: 105357. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105357>.
2. Chernenkova T., Belyaeva N., Maslov A., Titovets A., Novikov A., Kotlov I., Arkhipova M., Popchenko M. Long-Term Changes in the Structural and Functional Composition of Spruce Forests in the Center of the East European

- Plain. Forests. 2025; 16(10): 1526. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fl6101526>.
3. Audinot T., Wernsdörfer H., Bontemps J.D. Ancient Forest statistics provide centennial perspective over the status and dynamics of forest area in France. *Annals of Forest Science*. 2020; 77: 77. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00987-5>.
 4. Aakala T., Kulha N., Kuuluvainen T. Human impact on forests in early twentieth century Finland. *Landscape Ecology*. 2023; 38: 2417–2431. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01688-w>.
 5. Chernenkova T., Belyaeva N., Novikov A., Kotlov I. Driving Factors of Forest Typological Diversity in the Moscow Region. *Forests*. 2024; 15(10): 1683. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fl15101683>
 6. Korotkov S.A. Smena sostava drevostoev i ustojchivost' zashchitnyh lesov central'noj chasti Russkoj ravniny [Changes in the composition of forest stands and the stability of protective forests in the central part of the Russian Plain]. *Moskva [Moscow], ANO «Doblest' epoh», 2023; 168 p.* – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=52797028>.
 7. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. *Dinamika pokazatelej zemel' lesnogo fonda i sanitarnogo sostoyaniya lesov Moskovskoj oblasti* [Dynamics of forest lands and sanitary condition of forests in the Moscow region]. *Oroshaemoe zemledelie [Irrigated Agriculture]*. 2024; 2(45): 60-67. – DOI: <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2024-2-10>.
 8. Zamolodchikov D.G., Grabovskiy V.I., Kaganov V.V. *Ekosistemnye uslugi i prostranstvennoe raspredelenie zashchitnyh lesov Rossijskoj Federacii* [The ecosystem services and spatial distribution of protective forests in Russian Federation]. *Lesovedenie*. 2021; 6: 581-592. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114821060115>.
 9. Balashkevich Yu.A., Balukhta L.P. *K voprosu rasprostraneniya osnovnyh vidov boleznej v lesah Central'nogo federal'nogo okruga* [On the issue of the distribution of the main types of diseases in the forests of the Central Federal District]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2025; 253: 168-177. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.253.168-177>.
 10. Moiseev N.A., Surkanov O.I. *Problemy lesov Podmoskov'ya i al'ternativy ih resheniya* [Problems of Forests Near Moscow and Ways to its Solutions]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik [Forestry Bulletin]*. 2014; 18(3): 141-145. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21638395>.
 11. Yermenko N.P., Nazarenko E.B., Gamsakhurdia O.V. *Problemy lesov Podmoskov'ya* [Problems of the Forests of Moscow Region]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo* [Modern Science: Current Issues of Theory and Practice. Series: Economics and Law]. 2019; 3: 15-19. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38217526>.
 12. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. *Potencial'naya drevesnaya produktivnost' lesov Moskovskoj obl. v usloviyah izmeneniya klimata* [Potential Wood Productivity of Forests of Moscow Region in Conditions of Changing Climate]. *Lesohozyajstvennaya informaciya [Forestry Information]*. 2025; 1: 36-48. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04>.
 13. Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. *Ocenka reakcii populyacij Picea abies (L.) H. Karst. Moskovskoj oblasti na izmeneniya klimata* [Evaluation of the Populations Response of Juvenile *Picea abies* (L.) H. Karst. Trees of the Moscow Region to Climate Change]. *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov]. 2025; 3(80): 82-92. – DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2025.80.3.009>.
 14. Maslov A.A. *Biologicheskoe raznoobrazie korennyh tipov lesa v zapovednyh lesnyh uchastkah Moskovskogo regiona* [Biodiversity of the Native Forest Types in Strict Scientific Forest Reserves of the Moscow Region]. *Lesovedenie*. 2022; 6: 631-642. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114822060067>.
 15. Suslova E.G. *Les Moskovskoj oblasti* [Forests of Moscow Region]. *Ekosistemy: ekologiya i dinamika* [Ecosystems: Ecology and Dynamics]. 2019; 3(1): 119-190. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38470777>
 16. Kiseleva V.V. *Dinamika tipov lesa i tipov nasazhdenij nacional'nogo parka "Losinyj ostrov"* [Dynamics of Forest and Stand Types in the National Park Losinyi Ostrov]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik [Forestry Bulletin]*. 2019; 23(2): 20-28. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-2-20-28>

17. Belyaeva N.G., Chernenkova T.V., Maslov A.A. *Dinamika starovozrastnyh elovyh lesov Moskovskoy oblasti* [Dynamics of Old-Growth Spruce Forests in the Moscow Region]. *Regional'nye problemy* [Regional Problems]. 2025; 28(2): 39-43. – DOI: <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2025-28-2-39-43>.
18. Freund S.M., Newingham B.A., Chambers J.C., Urza A.K., Roundy B.A., Cushman J.H. Plant functional groups and species contribute to ecological resilience a decade after woodland expansion treatments. *Ecosphere*. 2021; 12(1): e03325. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3325>.
19. Dyderski M.K., Paż-Dyderska S., Jagodziński A.M., Puchałka R. Shifts in native tree species distributions in Europe under climate change. *Journal of Environmental Management*. 2025; 373: 123504. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123504>.
20. Chernenkova T., Kotlov I., Belyaeva N., Suslova E. Spatiotemporal Modeling of Coniferous Forests Dynamics along the Southern Edge of Their Range in the Central Russian Plain. *Remote Sensing*. 2021; 13(10): 1886. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13101886>.
21. Kiseleva V., Stonozhenko L., Korotkov S. The dynamics of forest species composition in the Eastern Moscow Region. *Folia Forestalia Polonica, Series A*. 2020; 62(2): 53-67. – DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2020-0007>.
22. Zakharov V.P., Korotkov S.A. *Dinamika lesov Vostochnogo Podmoskov'ya i ih ispol'zovanie* [Dynamics of forests in the Eastern Moscow region and their use]. In: *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchyonih i specialistov, posvyashchyonnoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya A.Ya. Milovicha: Sbornik statej, Moskva, 03–05 iyunya 2024 goda* [Proceedings of the International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists dedicated to the 150th anniversary of the birth of A.Ya. Milovich: Collection of articles, Moscow, June 3–5, 2024]. Moskva [Moscow], *Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet – MSKHA imeni K.A. Timiryazeva* [Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy], 2024; 144-149. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74459762>.
23. Kotlov I., Chernenkova T., Belyaeva N. Urban forests of Moscow: typological diversity, succession status, and fragmentation assessment. *Landscape Ecology*. 2023; 38: 3767–3789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01788-7>.
24. Lezhnev D.V., Menyaeva V.A. *Sostoyanie zhivogo napochvennogo pokrova v nasazhdeniyah Pinus sylvestris L. nacional'nogo parka «Losinyj ostrov»* [State of Living Ground Cover in *Pinus sylvestris* L. Stands of the Losiny Ostrov National Park]. *Timiryazevskij biologicheskij zhurnal* [Timiryazev Biological Journal]. 2025; 1: 202531104. – DOI: <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2025-3-1-1-04>.
25. Muchnik E.E., Tikhonova E.V., Averchenkov I.M., Neslukhovskiy I.Yu., Zakharinsky A.Yu., Komarov A.V., Kozhin M.N., Sementsova M.V. *Valuevskij lesopark kak perspektivnaya osobo ohranyaemaya prirodnaya territoriya v predelakh Novoy Moskvy* [Valuyevsky urban forest as a prospective protected area in "New Moscow"]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences]. 2020; 8: 90-103. – DOI: <https://doi.org/10.17076/bg1217>.
26. Manji O., Yaroslavtsev A.M., Vasenev I.I. *Ocenka antropogennoego vozdejstviya na lesnye ekosistemy goroda Moskvy* [An assessment of anthropogenic impact on forest ecosystems in Moscow]. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023; 6(34): 1. – DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.34.2>.
27. Suslov A.V., Nagimov Z.Ya., Korelina A.A. *Organizaciya monitoringa nasazhdenij v lesoparkah goroda Ekaterinburga s primeneniem matematiko-statisticheskikh metodov* [Organization of Monitoring of Plantings in Forest Parks of the City of Yekaterinburg with the Use of Mathematical and Statistical Methods]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Achievements of Modern Natural Science]. 2021; 6: 35-41. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37638>.
28. Kuznetsova N., Sautkina M. *Sostoyanie lesov i dinamika ih porodnogo sostava v Central'nom federal'nom okruge* [Forest State and Dynamics of Their Species Composition in the Central Federal District] // *Lesohozyajstvennaya informaciya* [Forestry Information]. 2019; 2: 25-45. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03>.
29. Mayorova E.I., Shershneva V.D. *Gorodskie lesa Moskvy v svete izmenenij Lesnogo kodeksa Rossijskoj Federacii*

- 2023 goda [Moscow Urban Forests in View of Russian Federation Forestry Code Changes in 2023]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik* [Forestry Bulletin]. 2024; 28(3): 87-95. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-3-87-95>.
30. Abate D., Botequim B., Marques S., Lagoa S., Hernández J.G., Hengeveld G., Hoogstra-Klein M., Borges J.G. Recreational and aesthetic values of forest landscapes (RAFL): Quantifying management impacts and trade-offs with provisioning and regulatory ecosystem services. *Forest Ecosystems*. 2025; 13: 100318. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2025.100318>.
31. López-Rodríguez A., Hernández-Jiménez V. Sustainable Forest, Beautiful Forest, Well-Managed Forest: Attitudes towards Land Management and Their Influence on the Perception of a Mediterranean Agroforestry Landscape. *Land*. 2022; 11(8): 1260. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land11081260>.
32. de Jesus França L.C., Júnior F.W.A., e Silva C.S.J., Monti C.A.U., Ferreira T.C., de Oliveira Santana C.J., Gomide L.R. Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review. *Trees, Forests and People*. 2022; 8: 100275. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100275>.

Сведения об авторах

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

Захаров Владимир Петрович – заместитель начальника отдела экологического просвещения и медиакоммуникаций, ГАУ МО «Мособллес», Рублево-Успенское шоссе, 1-й километр, д. 1А, д. Раздоры, Одинцовский г.о., Московская обл., Российская Федерация, 143082, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0176-6053>, e-mail: zakharov@forest.ru.

Коротков Сергей Александрович – канд. биол. наук, доцент кафедры «Лесоводство, экология и защита леса», Мытищинский филиал ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Российская Федерация, 141005; старший научный сотрудник лаборатории лесоводства и биологической продуктивности, ФГБУН Институт лесоведения Российской академии наук, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Одинцовский г.о., Московская обл., Российская Федерация, 143030, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2754-6014>, e-mail: skorotkov-71@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Aleksandr V. Lebedev* – DSci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Land Organization and Forestry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, Russian Federation, 127434, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru.

Vladimir P. Zakharov – Deputy Head of the Department of Environmental Education and Media Communications, Mosoblles, Rublevo-Uspenskoe av., 1 km, b. 1A, Razdory village, Odintsovo district, Moscow region, Russian Federation, 143082, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0176-6053>, e-mail: zakharov@forest.ru.

Sergey A. Korotkov – Cand. Sci (Bio.), Associate Professor of the Department of Forestry, Ecology and Forest Protection, Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya st, 1, Mytischki, Moscow region, Russian Federation, 141005; Senior Researcher at the Laboratory of Forestry and Biological Productivity, Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st., 1, Uspenskoye village, Odintsovo district, Moscow region, Russian Federation, 143030, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2754-6014>, e-mail: skorotkov-71@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author



Анализ региональных кривых роста *Picea obovata* Ledeb. на Южном Урале

Григорий И. Ложкин^{1,2}✉, lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

Андрей А. Григорьев³, grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

Сергей О. Вьюхин³, sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

Нелли А. Чижикова¹, nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008,
Российская Федерация

²Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, г. Москва, 119017, Российская Федерация

³Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук,
ул. 8 Марта, 202, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

Характеристики колец деревьев зависят от различных факторов. Как правило, в ходе анализа влияния внешних факторов производят удаление вклада возраста в радиальный прирост. Наряду с индивидуально подобранными по каждому дереву зависимостями, для этого шага используют региональных кривые роста, под которыми понимают эмпирически определенные кривые, описывающие связь между возрастом и характеристиками годичных колец на некоторой территории. Целью данной работы обозначено выявление различий в радиальном приросте ели сибирской на верхней границе распространения на Южном Урале с помощью анализа региональных кривых роста. Суммарно в анализе использованы измерения прироста 989 деревьев. Ожидаемая ширина годичных колец ели сибирской на Южном Урале описана с помощью кривой Хугерсхоффа. Исследованы популяции ели на трех хребтах: Нары, Зигальга и Таганай. Так как в настоящее время происходит расселение ели сибирской на территории горной тундры, не на всех высотных уровнях удалось оценить параметры региональных кривых. Наибольшее значение ожидаемого максимального прироста (от 2.1 до 2.7 миллиметров) отмечено на нижних высотных уровнях юго-восточного склона в перевале между горой Поперечная и горой Круглая (хребет Зигальга), что может быть объяснено благоприятными условиями инсоляции и не высокой скоростью ветра, по сравнению с хребтом Таганай.

Ключевые слова: Южный Урал, региональные кривые роста, радиальный прирост, ель сибирская

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭРиЖ УрО РАН № 122021000083-7.

Конфликт интересов: коллектив авторов заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Анализ региональных кривых роста *Picea obovata* Ledeb. на Южном Урале / Г. И. Ложкин, А. А. Григорьев, С. О. Вьюхин, Н. А. Чижикова // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 69–87. – Библиогр.: с. 83–87 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/5>.

Поступила 23.12.2025. Пересмотрена 29.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Article

**Analysis of regional growth curves of *Picea obovata* Ledeb.
in the Southern Urals**

Grigory I. Lozhkin^{1,2}✉, lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658

Andrey A. Grigoriev³, grigoriev.a.a@ipac.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654

Sergey O. Vyukhin³, sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878

Nelli A. Chizhikova¹, nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Kremlevskaya Street, 18, Kazan, 420008, Russian Federation

²Institute of Geography, RAS, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation

³Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8th March Street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

Abstract

Tree ring characteristics depend on various factors. Typically, when analyzing the influence of external factors, the contribution of age to radial increment is removed. Along with individually fitted curves for each tree, regional growth curves are used for this step. Regional growth curves are empirically determined curves describing the relationship between age and tree ring characteristics in a given area. The aim of this study is to identify differences in radial increment of Siberian spruce at the upper limit of its distribution in the Southern Urals by analyzing regional growth curves. In total, growth measurements from 989 trees were used in the analysis. The expected tree ring width of Siberian spruce in the Southern Urals is described using the Huggershoff curve. Spruce populations were studied on three ridges: Nary, Zigalga, and Taganay. Since the Siberian spruce is currently spreading across the alpine tundra, it was not possible to estimate the parameters of the regional curves at all altitude levels. The highest value of the expected maximum increase (from 2.1 to 2.7 millimeters) was noted at the lower altitude levels of the south-eastern slope in the pass between Mount Poperechnaya and Mount Kruglaya (Zigalga ridge), which can be explained by favorable insolation conditions and low wind speed, compared to the Taganay ridge.

Keywords: *Southern Urals, regional growth curves, radial increment, Siberian spruce*

Funding: The study was performed under the state assignment of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, the Russian Academy of Sciences (№ 122021000083-7).

Conflict of interest: the team of authors declares that there is no conflict of interest.

For citation: Lozhkin G. I., Grigoriev A. A., Vyukhin S. O., Chizhikova N. V. (2026). Analysis of regional growth curves of *Picea obovata* Ledeb. in the Southern Urals. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 69-87 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/5>.

Received 23.12.2025. **Revised** 29.01.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Древесные кольца растений являются ценным архивом, в котором отражены изменения популяции и экосистемы в годичном разрешении. Характеристики колец деревьев зависят от различных факторов, которые обобщенно можно разделить на климат, возраст и возмущения⁸. Возмущения, в свою очередь, подразделяются на локальные (например, падение соседнего дерева) и на общие для некоторой популяции (например, нашествие насекомых); иногда общие возмущения имеют глобальный масштаб [1]. Для оценки влияния одних факторов из ряда измерений исследователи извлекают вклад других факторов. Так, удаление возмущений из исходных рядов производят через алгоритмическое разделение сигналов [2], а также с помощью отсеивания местообитаний и особей на этапе отбора проб⁹.

Для получения климатической составляющей из исходного ряда наблюдений изымают зависимость характеристики кольца от возраста. Причем этот шаг производят как на уровне отдельных деревьев¹⁰, так и на уровне пробной площади или района с использованием региональной кривой роста (РКР)[3]. Под РКР понимают эмпирически определенную кривую, предназначенную для описания зависимости характеристики древесного кольца от возраста. Особенности

РКР представляют интерес не только при выявлении возрастного тренда, но и для отслеживания изменений в популяции, а также для оценки влияния климата на прирост. В исследовании Наурзбаева и др.¹¹ дан анализ параметров РКР, полученных через аппроксимацию по кривой отрицательной экспоненты: обнаружен широтный, высотный и температурный градиенты для ширины годичного кольца (ШГК) лиственницы в Сибири. Также показана зависимость формы РКР *Pinus sylvestris* от плотности популяции¹² и от условий увлажнения субстрата [4]. Разделение на типы РКР было выполнено для отслеживания изменений в радиальном приросте для *Picea albertiana* и *Picea glauca* [5].

Моноotonно убывающая функция отрицательной экспоненты не единственный вид зависимости, используемый для описания связи возраста и характеристик годичных колец. Широко используется кривая Хугерсхоффа [6], которая, по сути, является расширенной версией кривой отрицательной экспоненты с возможностью роста характеристики кольца в начале временной оси. Такая динамика характерна для особей в популяциях с высокой степенью сомкнутости крон, например, подобная форма кривой встречается у елей *Picea albertiana* и *Picea glauca* в Канаде [5].

⁸Cook E.R., Kairiukstis L.A. Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. – Dordrecht: International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, 1990, 394 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>

⁹Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. – Красноярск: КрасГУ, 2000, 80 с.

¹⁰Fritts H. Tree rings and climate. – Academic Press., 1976. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>

¹¹Naurzbaev M.A., Hughes M., Vaganov E.A. Tree-ring growth curves as sources of climatic information. Quaternary research. 2004; 62: 126-133. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.06.005>

¹²Helama S., Timonen M., Lindholm M., Meriläinen J., Eronen M. Extracting long-period climate fluctuations from tree-ring chronologies over timescales of centuries to millennia. International journal of climatology. 2005; 25: 1767-1779. – DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1215>

Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) широко распространена на Урале: при продвижении на север этот вид чаще встречается на равнинах и речных поймах, в то же время, на юге произрастает в основном в высокогорьях¹³. Показано, что свойства субстрата в условиях дражных отвалов после золотодобычи (Средний Урал) влияют на высоту ели сибирской, а также на годичный линейный прирост ствола и ветвей [7]. На Южном Урале из-за глобального изменения климата [8] верхняя граница распространения ели сибирской смещается выше в горы [9, 10, 11], что с одной стороны, способствует увеличению депонирования углерода из атмосферы, а с другой - приводит к вымиранию эндемиков горной тундры [12; 13; 14; 15]. При этом связь радиального прироста (по данным после удаления возрастной изменчивости) ели сибирской со средней температурой лета слабая¹⁴. В этой связи зависимость морфометрических характеристик от возраста на верхней границе ареала ели сибирской на Южном Урале представляет особый интерес.

Цель данной работы - выявление различий в радиальном приросте ели сибирской на верхней границе распространения на Южном Урале с помощью анализа региональных кривых роста (РКР). Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: заложение пробных площадей, измерение радиального прироста, оценка возраста особей, аппроксимация РКР с помощью кривой Хугерсхоффа и сопоставление параметров РКР различных вершин и склонов по высотным уровням.

Определяющую роль при формировании леса на границе с тундрой играет температурный фактор: логично ожидать наибольших показателей прироста при уменьшении географической широты и снижении высоты над уровнем моря. При этом весь анализируемый материал был отобран по одному и тому же принципу на высотных уровнях, выделенных по сомкнутости крон деревьев вдоль экотона «таежный лес – горная тундра», следовательно, различия условий среды были частично учтены на стадии отбора проб. В связи с этим «нулевая гипотеза» данной работы заключается в том, что все деревья одного уровня на разных вершинах и склонах должны иметь близкие значения параметров РКР, так как они сходятся по популяционному показателю (сомкнутость крон), который, в свою очередь, зависит от условий среды и стадии зарастания.

Материалы и методы

Территория исследования

На Южном Урале расположены самые южные горные тундры в Уральской горной стране. Южный Урал - единственная горная провинция Урала, где *Picea obovata* Ledeb. является повсеместно доминирующим древесным видом на границе леса, реже на отдельных участках встречается *Betula pubescens* ssp. *Tortuosa* Ledeb. Выше границы леса на открытых участках в тундре произрастает *Juniperus sibirica* Burgsd., местами формируя отдельный пояс растительности [12].

В настоящей работе выполнено исследование участков леса на границе с тундрой на трех хребтах в южной (Нары, г. Кашкатура), средней (Зигальга, перевал

¹³Мамаев С.А. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 112 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26807083>

¹⁴Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. АН СССР, Урал. науч. центр, Ин-т экологии растений и животных. — М.: Наука, 1986. — 135 с.

между г. Поперечная и г. Лысая) и северной (Таганай, г. Дальний Таганай) частях Южного Урала (рис. 1).

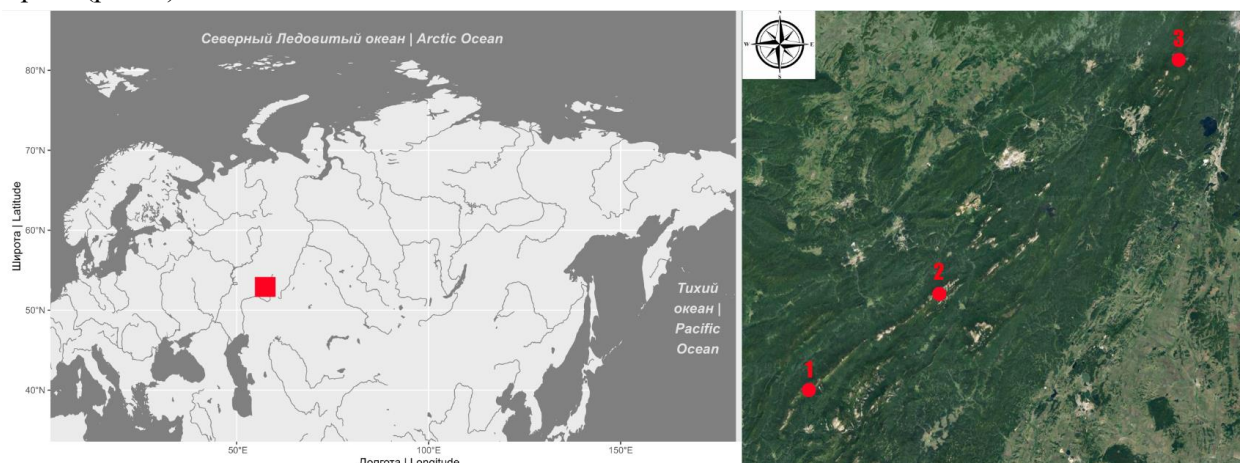


Рисунок 1. Расположение участков исследования: хребет Нары (1), хребет Зигальга (2), хребет Таганай (3)
Источник: составлено авторами, космоснимок: Google ©CNES/Airbus, Maxar technologies.

Figure 1. Location of the study sites: Nary Ridge (1), Zigalga Ridge (2), Taganay Ridge (3)

Source: compiled by the authors, satellite image: Google ©CNES/Airbus, Maxar Technologies.

Из-за небольшого количества различных по климату и рельефу участков (3 хребта) в рамках настоящей работы не предполагается сравнение параметров РКР с показателями среды статистическими методами. Тем не менее, для интерпретации полученных результатов необходимо иметь представление о различиях местообитаний по характеристикам климата и рельефа. Так как неоднородность климатических условий между склонами одного хребта сложно выявить по метеостанциям (расположенным на некотором удалении от исследуемых участков), в анализе были использованы значения из открытых источников [16, 17, ¹⁵, ¹⁶], которые сгруппированы в регулярных сетках. Отметим, что значения в ячейках усреднены сразу за несколько десятилетий (таб. 1). Сформированные по такому принципу наборы широко используется при

моделировании видового разнообразия, также эти данные применимы для сопоставления с параметрами РКР, которые получены по измерениям ШГК за несколько десятков или сотен лет.

Затруднительно определить, на сколько сильно оценки температуры и осадков (таб. 1) отличаются от наблюдений метеостанций из-за разных принципов формирования рядов. Например, в коллекции [16] дневная или ночная температура определены по медианным значениям с использованием данных дистанционного зондирования Земли, в то время, как доступные нам ряды температуры метеостанции «Таганай-гора» представлены в среднесуточном или среднемесечном разрешении. О заниженной скорости ветра в таб. 1 можно заключить после сравнения с данными метеостанции «Таганай-гора», где средняя скорость оценена

¹⁵Abatzoglou J. T., Dobrowski S. Z., Parks S. A., Hegewisch K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. Scientific Data. 2018; 5: 170191. – DOI: 10.1038/sdata.2017.191

¹⁶Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe. Version 4 [Электронный ресурс]. CGIAR Consortium for Spatial Information, 2008. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 07.12.2025).

в пределах от 9.6 до 13 м/с [12]. Одной из причин занижения оценок скорости ветра на Таганай и других хребтах является усреднение скорости внутри ячейки растра размером ~4 км, из-за чего помимо незаросших фрагментов тундры и каменистых россыпей в расчет попадают и лесные участки с высокой степенью сомкнутости. С использованием платформы Google Earth Engine [18] выделены средние или суммарные значения за несколько лет для линий верхних границ редины с буфером 100 м (таб. 1). Выбраны именно границы редины, так как они характерны для мест наиболее явного перехода из леса в тундру вдоль экотона.

Характерной особенностью рельефа Южного Урала является наличие древних поверхностей выравнивания, поднятых на разную высоту. Поэтому здесь преобладают плосковершинные или куполовидные хребты и массивы, независимо от их высоты. На склонах развиты гольцовые нагорные террасы, которые придают ступенчатость склонам. На каменистых россыпях и останцах гольцовых вершин формируются примитивные аккумулятивные почвы. Верхний горизонт горно-тундровых почв перегнойно-торфянистый, в нем значительно больше разложившихся растительных остатков, чем минеральных частиц. В местах

накопления мелкозема развиты горно-тундровые и дерновые горно-луговые почвы. Низкорослые и разреженные леса подгольцового пояса произрастают на дерновых горно-лесных почвах. Формирование названных категорий почв тесно связано с разрушением каменных россыпей и накоплением мелкозема¹⁷. Нам не известны проведенные ранее работы, направленные на выявление отличий почвенных характеристик тундровых участков в разных частях Южного Урала. Отметим, что на всех рассматриваемых хребтах обнаружены сходные по видовому составу горные тундры, основные различия исследуемых участков отражены в высоте над уровнем моря, экспозиции склона, широтном расположении хребта, истории зарастания и современной сомкнутости крон древостоев.

Исследованиями были охвачены древостои ели сибирской, произрастающие в экотоне верхней границы древесной растительности в горах Южного Урала от верхней границы сомкнутых лесов до отдельных деревьев в тундре. Средний возраст деревьев варьирует от 80 лет на нижней части экотона до 25 лет в верхней части экотона, диаметр на высоте 1.3 м от 16 до 5 см, высота ствола от 7.5 до 2.5 м, соответственно [13; 14].

¹⁷Погодина Г.С., Розов Н.Н. Почвы // Урал и Пиренеи. – М.: Наука, 1968. – С. 167-210.

Таблица 1

Характеристика участков исследования. Показатели определены для территории вдоль границ редин. Температура получена через усреднение медианных оценок дневной температуры по месяцам. Обозначения склонов (в заголовках колонок): N – северо-восточный склон хребта Нары, Z1 – юго-восточный склон хребта Зигальга, Z2 – северо-западный склон хребта Зигальга, T1 – юго-западный склон хребта Таганай, T2 – северо-западный склон хребта Таганай

Table 1

Characteristics of study areas. The indicators are determined for the area along the boundaries of open forests. Temperature is derived by averaging the median daily temperature estimates by month. Slope designations: N – northeastern slope of the Nary Ridge, Z1 – southeastern slope of the Zigalga Ridge, Z2 – northwestern slope of the Zigalga Ridge, T1 – southwestern slope of the Taganay Ridge, T2 – northwestern slope of the Taganay Ridge

Высотный профиль Altitudinal transect	N	Z1	Z2	T1	T2	Период усреднения Averaging period	Источни к Source
Средняя температура, °C Average temperature, °C	1.83	1.40	1.77	2.10	2.19	с 2000 по 2021 год from 2000 to 2021	[16]
Сумма осадков, мм Total precipitation, mm	623	589	579	582	578	с 1950 по 2021 год from 1950 to 2021	[17]
Средняя скорость ветра на высоте 10 м, м/с Average wind speed at a height of 10 m, m/s	2.14	2.19	2.19	2.38	2.38	с 2000 по 2021 год from 2000 to 2021	⁸
Средняя высота, м Average height, m	1288	1260	1246	1088	1076	2003 с последующими обновлениями 2003 with subsequent updates	⁹

Источник: составлено авторами

Source: compiled by the authors

Отбор и подготовка материала

Данные в таб. 1 сгруппированы по заложенным в ходе полевых работ высотным профилям для склонов разной экспозиции. На каждом профиле пробные площади были заложены на 3 высотных уровнях: верхний уровень (уровень 1) – на верхней границе распространения отдельных деревьев в тундре; средний уровень (уровень 2) – на верхней границе распространения редин; нижний уровень (уровень 3) – на верхней границе распространения редколесий. Выбор направления закладки высотных профилей по экспозиции склона был осуществлен по принципу непрерывности: выбирались направления, по возможности, без резких

перепадов высот и прерываний градиента сомкнутости.

На трех высотных уровнях каждого из профилей были заложены от 3 до 7 пробных площадей в период с 2022 по 2025 годы. У всех деревьев на пробной площади были зафиксированы диаметр на основании, диаметр на высоте 1.3 м, диаметр кроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях и жизненное состояние. Для получения рядов радиального прироста и оценки возраста было выполнено изъятие образцов древесины (кernов) в основании дерева при помощи бура Пресслера с последующей обработкой kernов в лабораторных условиях и измерением

ширины годовичных колец на полуавтоматической установке Lintab 5 (подробное описание подготовки и измерения образцов дано в работе [14]). В случаях, когда керны не достигали центра ствола, для оценки года формирования центрального кольца производили расчёт недостающих колец при помощи прозрачной пленки с нанесёнными линиями окружностей разного размера. На отобранных образцах не были обнаружены следы пожаров, также при закладке пробных площадей не наблюдалось значительного количества усохших деревьев. Часть измеренных рядов ШГК ранее была задействована в работах, в которых не производился анализ РКР [12; 13; 14]. Суммарно для анализа РКР были использованы измерения ШГК для 989 деревьев.

Оценка параметров региональных кривых роста (РКР)

В данной работе выполнен анализ параметров кривой Хугерсхоффа, описывающей возрастную тенденцию радиального роста ели сибирской на Южном Урале с помощью функции вида:

$$I_t = at^b e^{(-ct)} + I_{min} \quad (1)$$

где I_t – моделируемая ШГК (мм) для возраста дерева t (лет); I_{min} – асимптота минимального значения, то есть, ожидаемый прирост старовозрастных особей, c – параметр, характеризующий вогнутость кривой (чем выше c , тем сильнее выражена вогнутость кривой). При повышении параметра a увеличивается разница между ожидаемым максимумом и минимумом РКР. В случае, когда параметр b равен нулю, функция принимает вид кривой модифицированной отрицательной экспоненты⁸. Максимальное значение прироста I_{max} достигается при $t=b/c$.

Аппроксимация РКР функцией Хугерсхоффа осуществлена методом наименьших квадратов с использованием функции `nls()` из пакета `nlme` [19] в R [20]. Запуск функции `nls()` выполнялся со стандартными настройками при увеличении максимального количества шагов с 50 до 100. Оценка доверительных интервалов выполнена через процедуру `bootstrap` [21] без дополнительной коррекции, описываемую следующими шагами: аппроксимация кривой Хугерсхоффа на случайной выборке из всех рядов на высотном уровне одного склона с возможными повторами (шаг 1), сохранение параметров кривой и оценок ШГК для возраста от 0 до 170 лет в отдельные коллекции (шаг 2), повтор шагов 1 и 2 в течении 2000 раз с разными выборками из общего набора (шаг 3). По квантилям 0.025, 0.5 и 0.975 полученного `bootstrap`-распределения были найдены соответствующие им нижняя граница, медиана и верхняя граница доверительного интервала (95%) для параметров кривой или оценок ШГК по возрастам от 0 до 170 лет.

Результаты и их обсуждение

При создании табл. 1 для условий среды в окрестностях верхних границ редины обнаружены следующие особенности:

1) Наибольшая средняя температура года характерна для хребта Таганай, наименьшая – для хребта Зигальга. При этом южные склоны теплее, в первую очередь, из-за более высокой инсоляции.

2) Наибольшая сумма осадков получена на хребте Нары, на других рассматриваемых хребтах – сумма осадков ниже, причем на склонах северо-западной экспозиции осадков больше, чем на склонах юго-восточной и юго-западной экспозиции. Западный макросклон Южного Урала получает большее количество влажных воздушных масс, при этом пробные

площади юго-западного склона на горе Дальний Таганай ограждены от них возвышенностью к западу от мест закладки пробных площадей [13].

3) Скорость ветра увеличивается при смещении на север, где сильнее доминируют арктические воздушные массы [9].

4) Средняя высота расположения верхней границы редины уменьшается при сравнении северных участков с более южными, так как линии изотерм смещаются на более низкие высоты. При этом высота верхней границы редины на северо-западных склонах выше, чем высота на юго-западных и юго-восточных склонах. Вероятно, это связано с более высокой скоростью расселения особей, которой при переносе семян способствует западный ветер [14].

Результаты аппроксимации РКР по кривой Хугерсхоффа выведены на рис. 2-4.

Перед анализом параметров РКР мы обозначим несколько заключений по диаграммам рассеяния, исходя из предположения, что по возрасту наиболее зрелых особей на высотных уровнях можно дать приблизительную оценку датам начала заселения территории.

По диаграммам рассеяния трех высотных уровней хребта Нары (рис. 2) можно выделить следующую особенность: на верхнем уровне, в отличие от нижнего и среднего уровней, обнаружены несколько особей старше 120 лет. Вероятно, расселение на хребте Нары проходило почти одновременно на всех высотных уровнях. Из чего следует, что различия РКР данного хребта в большей степени определены условиями среды и в меньшей степени – различиями возраста особей на высотных уровнях.

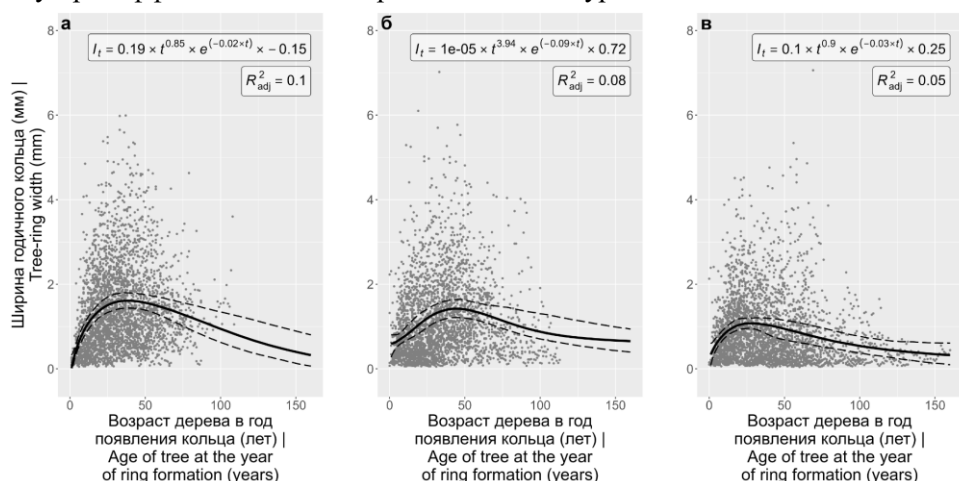


Рисунок 2. Результаты оценки параметров РКР хребта Нары на нижнем (а), среднем (б) и верхнем (в) высотном уровне склона северо-восточной экспозиции. Диаграмма рассеяния - измерения ШГК всех деревьев за каждый год. Для каждого уровня в верхней части графиков выведены результаты аппроксимации по уравнению 1 для полного набора точек с исправленным R^2 . Медиана (черная линия) и границы доверительных интервалов (пунктир) для оценок ШГК получены с помощью процедуры «bootstrap»

Источник: составлено авторами

Figure 2. Results of estimating the parameters of the Nary Ridge's RGC at the lower (a), middle (b), and upper (c) elevation levels of the northeastern-facing slope. Scatterplot plots the TRW measurements for all trees for each year. For each level, the results of approximation according to equation 1 for the full set of points with corrected R^2 are shown at the top of the graphs. The median (black line) and confidence interval boundaries (dashed line) for the TRW estimates were obtained using the bootstrap procedure

Source: compiled by the authors

На диаграммах рассеяния северо-западного склона хребта Зигальга (рис. 3г-е) заметнее различия по возрасту наиболее зрелых особей на разных высотных уровнях: возраст превышает 150 лет на нижнем уровне и не доходит до 100 лет на среднем и верхнем уровнях, в то время, как на юго-восточном склоне (рис. 3а-в) возраст наиболее зрелых

особей на всех высотах лежит в пределах от 90 до 115 лет, за исключением одного дерева на уровне 2 (рис. 3б, ось x ограничена до 155 лет), возраст которого достигает 190 лет. Полученный результат сходится с выводом о более высокой скорости расселения особей на северо-западном склоне хребта Зигальга [14], по крайней мере, для последних десятилетий.

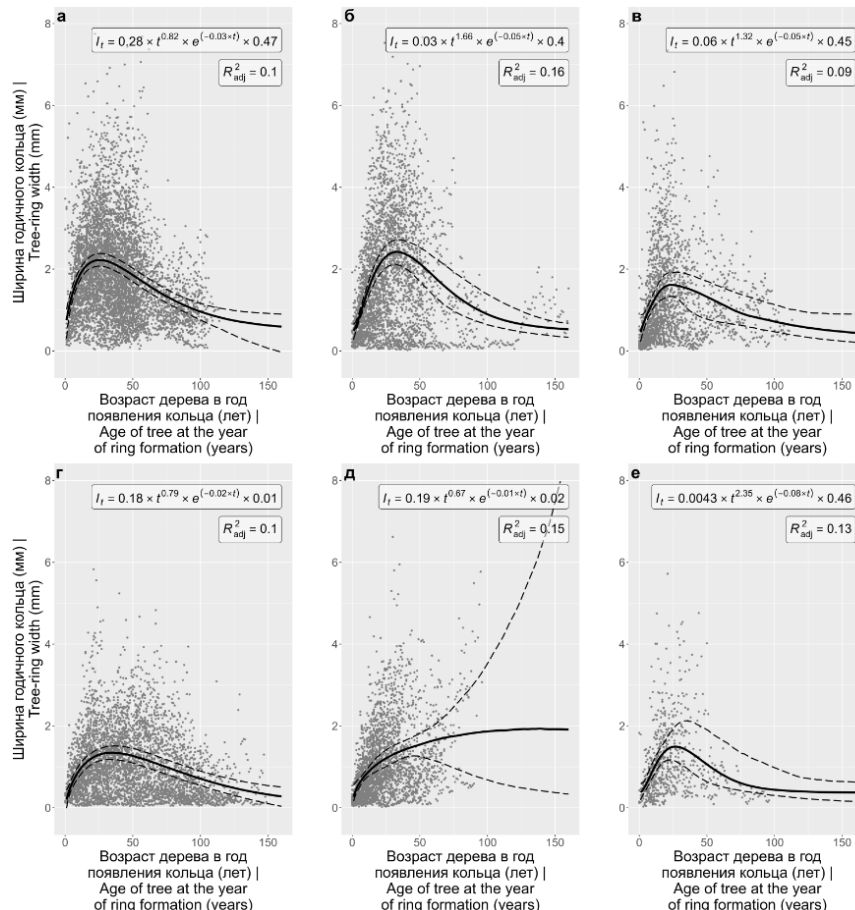


Рисунок 3. Результаты оценки параметров РКР хребта Зигальга на нижнем (а), среднем (б) и верхнем (в) высотном уровне склона юго-восточной экспозиции и на нижнем (г), среднем (д) и верхнем (е) высотном уровне склона северо-западной экспозиции. Условные обозначения совпадают с условными обозначениями к рис. 2.

Источник: составлено авторами.

Figure 3. Results of the assessment of the parameters of the Zigalga ridge RGC at the lower (a), middle (b) and upper (c) altitude levels of the south-eastern slope and at the lower (g), middle (d) and upper (e) altitude levels of the north-western slope. The legend coincides with the legend to Fig. 2.

Source: compiled by the authors

На среднем уровне северо-западного склона Зигальги (рис. 3д) не удалось с достаточной степенью уверенности (95%) определить возраст ожидаемого максимума

ШГК, так как не все варианты РКР в границах доверительных интервалов перешли в стадию снижения ШГК. По такому же принципу на хребте Таганай не удалось определить возраст

ожидаемого максимума ШГК верхних уровней (рис. 4 в, е). Перечисленные участки были исключены из дальнейшего анализа. На всех остальных уровнях хребта Таганай возраст зрелых особей достигает 90-110 лет, с большим количеством зрелых особей на нижних уровнях (рис. 4 а, б, г, д). Таким образом, начало расселения могло происходить приблизительно в одни и те же годы с обоих склонов и раньше началось на нижнем уровне.

Важно отметить, что оценки времени начала заселения высотных уровней по диаграммам рассеяния носят приблизительный характер, так как при анализе подобных диаграмм нельзя учесть смертность особей: неизвестно, являются ли наиболее старые обнаруженные живые деревья первыми, заселившими ту или иную пробную площадь.

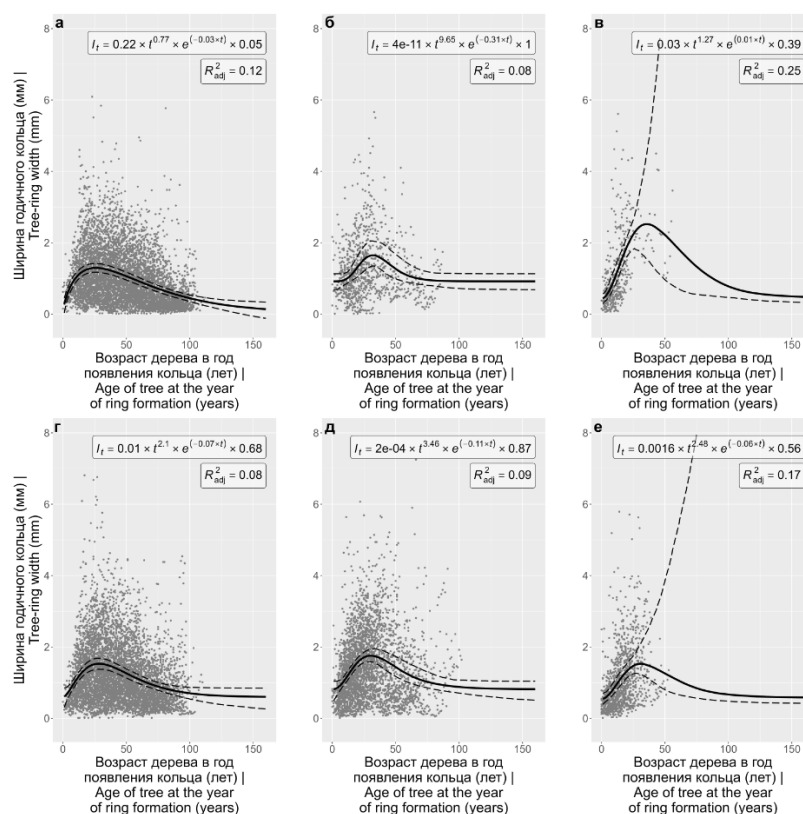


Рисунок 4. Результаты оценки параметров РКР хребта Таганай на нижнем (а), среднем (б) и верхнем (в) высотном уровне склона юго-западной экспозиции и на нижнем (г), среднем (д) и верхнем (е) высотном уровне склона северо-западной экспозиции. Условные обозначения совпадают с условными обозначениями к рис. 2

Источник: составлено авторами

Figure 4. Results of assessing the parameters of the Taganay Ridge's RGC at the lower (a), middle (b), and upper (c) elevation levels of the southwestern-facing slope and at the lower (d), middle (e), and upper (e) elevation levels of the northwestern-facing slope. The legend matches that in Fig. 2

Source: compiled by the authors

Для более наглядного сравнения параметров мы вывели полученные из их bootstrap-распределений доверительные

интервалы (95%) в виде отрезков с нанесенными медианами (рис. 5). Для определения статистической значимости

различий получены распределения с разницами 2000 сгенерированных параметров: различия считаются значимыми если квантили 0.025 и 0.975 имеют один знак

(оба выше или ниже 0). Значения, использованные при построении рис. 5, выведены в табл. 2.

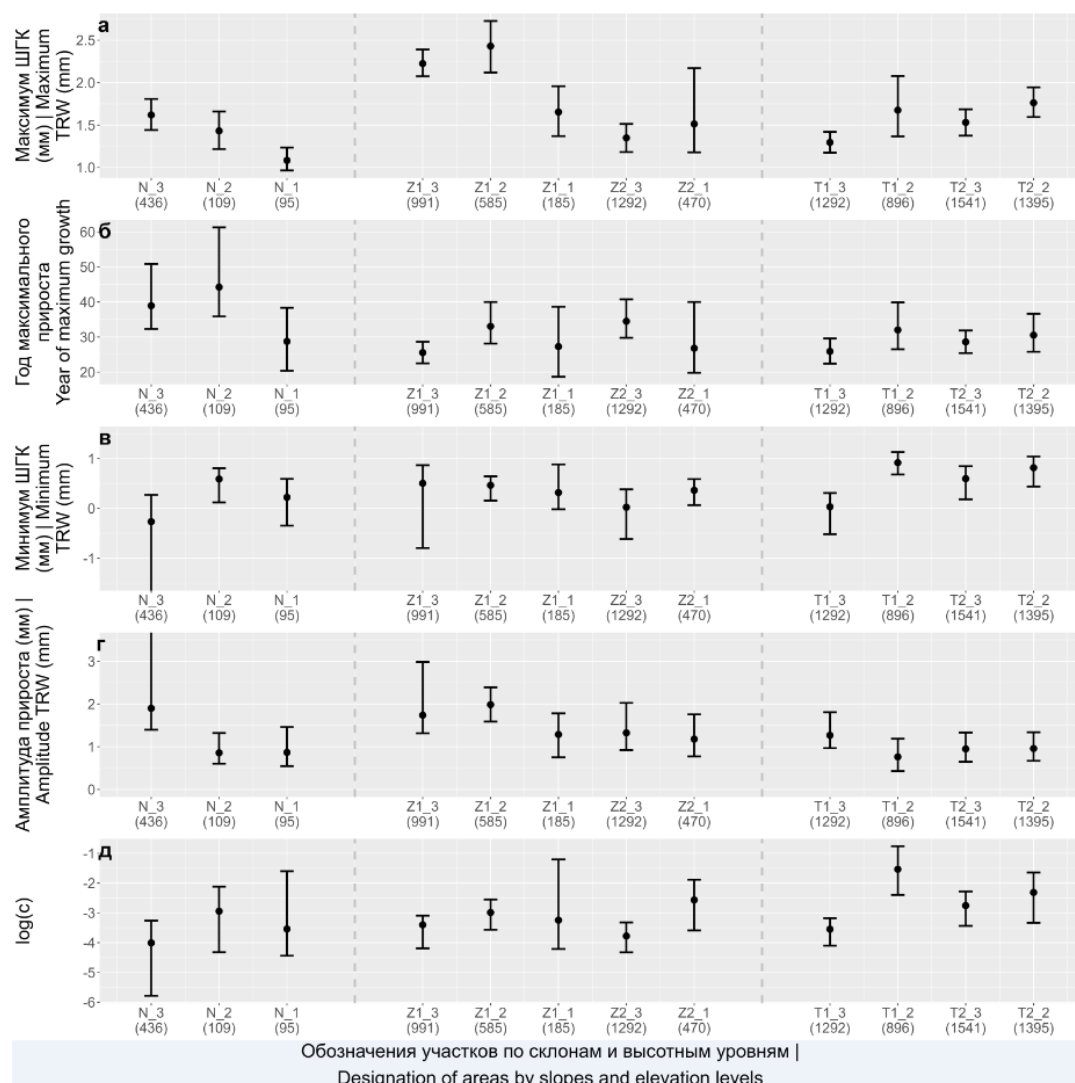


Рисунок 5. Границы доверительных интервалов параметров РКР

Figure 5. Boundaries of the confidence intervals of the RGC parameters.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors

Обозначения склонов: N – северо-восточный склон хребта Нары, Z1 – юго-восточный склон хребта Зигальга, Z2 – северо-западный склон хребта Зигальга, T1 – юго-западный склон хребта Таганай, T2 – северо-западный склон хребта Таганай. Высотный уровень обозначен по последней цифре (1, 2 или 3). В скобках указана густота древостоя (особей/гектар). Для улучшения визуального сопоставления между уровнями не показана часть границ для уровня «N_3» (в) и (г).

Slope designations: N – northeastern slope of the Nary Ridge, Z1 – southeastern slope of the Zigalga Ridge, Z2 – northwestern slope of the Zigalga Ridge, T1 – southwestern slope of the Taganay Ridge, T2 – northwestern slope of the Taganay Ridge. The altitudinal level is designated by the last digit (1, 2 or 3). The tree stand density (individuals/hectare) is given in parentheses. To improve visual comparison between the levels, some of the boundaries for level "N_3" (c) and (d) are not shown.

Параметр Parameter	N_3	N_2	N_1	Z1_3	Z1_2	Z1_1	Z2_3	Z2_1	T1_3	T1_2	T2_3	T2_2
I_{max} (0.025)	1.4	1.2	1.0	2.1	2.1	1.4	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4	1.6
I_{max} (0.5)	1.6	1.4	1.1	2.2	2.4	1.7	1.4	1.5	1.3	1.7	1.5	1.8
I_{max} (0.975)	1.8	1.7	1.2	2.4	2.7	2.0	1.5	2.2	1.4	2.1	1.7	2.0
t_{max} (0.025)	32.3	35.9	20.4	22.5	28.1	18.7	29.8	19.8	22.4	26.5	25.4	25.8
t_{max} (0.5)	38.9	44.2	28.8	25.6	33.1	27.3	34.5	26.8	25.9	32.0	28.6	30.5
t_{max} (0.975)	50.8	61.3	38.3	28.7	40.0	38.6	40.7	40.0	29.6	39.9	31.9	36.6
I_{min} (0.025)	-4.1	0.1	-0.4	-0.8	0.2	0.0	-0.6	0.1	-0.5	0.7	0.2	0.4
I_{min} (0.5)	-0.3	0.6	0.2	0.5	0.5	0.3	0.0	0.4	0.0	0.9	0.6	0.8
I_{min} (0.975)	0.3	0.8	0.6	0.9	0.6	0.9	0.4	0.6	0.3	1.1	0.9	1.0
I_{delta} (0.025)	1.4	0.6	0.5	1.3	1.6	0.8	0.9	0.8	1.0	0.4	0.7	0.7
I_{delta} (0.5)	1.9	0.9	0.9	1.7	2.0	1.3	1.3	1.2	1.3	0.8	1.0	1.0
I_{delta} (0.975)	5.5	1.3	1.5	3.0	2.4	1.8	2.0	1.8	1.8	1.2	1.3	1.3
$\log(c)$ (0.025)	-5.8	-4.3	-4.4	-4.2	-3.6	-4.2	-4.3	-3.6	-4.1	-2.4	-3.4	-3.3
$\log(c)$ (0.5)	-4.0	-2.9	-3.5	-3.4	-3.0	-3.3	-3.8	-2.6	-3.6	-1.5	-2.8	-2.3
$\log(c)$ (0.975)	-3.3	-2.1	-1.6	-3.1	-2.6	-1.2	-3.3	-1.9	-3.2	-0.8	-2.3	-1.7

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors

Обозначения склонов (в заголовках колонок): N – северо-восточный склон хребта Нары, Z1 – юго-восточный склон хребта Зигальга, Z2 – северо-западный склон хребта Зигальга, T1 – юго-западный склон хребта Таганай, T2 – северо-западный склон хребта Таганай. Высотный уровень обозначен по последней цифре (1, 2 или 3). Параметры: I_{max} – максимальная ШГК (мм), t_{max} – год достижения максимальной ШГК (лет), I_{min} – минимальная ШГК (мм), I_{delta} – амплитуда ШГК (мм), c – безразмерная величина, характеризующая вогнутость РКР. Значение в скобках – квантиль bootstrap-распределения для соответствующего параметра РКР.

Slope designations: N – northeastern slope of the Nary Ridge, Z1 – southeastern slope of the Zigalga Ridge, Z2 – northwestern slope of the Zigalga Ridge, T1 – southwestern slope of the Taganay Ridge, T2 – northwestern slope of the Taganay Ridge. The altitudinal level is designated by the last digit (1, 2 or 3). Parameters: I_{max} – maximum TRW (mm), t_{max} – year of reaching the maximum TRW (years), I_{min} – minimum TRW (mm), I_{delta} – TRW amplitude (mm), c – dimensionless value characterizing the

concavity of the RGC. The value in brackets is the bootstrap distribution quantile for the corresponding parameter of the RGC.

Среднее значение остатков, определенных как разница между измеренной ШГК и оценкой по кривой Хугерсхоффа, для рассматриваемых площадок варьирует от $-2.65 \cdot 10^{-6}$ до $4.9 \cdot 10^{-7}$, а стандартное отклонение меняется от 0.65 до 0.94, что можно считать приемлемым результатом аппроксимации. Однако медиана остатков находится в диапазоне от -0.26 до -0.07, кроме этого, skewness-статистика принимает положительные значения (от 0.86 до 1.79). Распределение остатков по всем пробным площадям не является нормальным (p -value<0.01 для теста Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса), а медиана значимо отличается от 0 (p -value<0.01 для теста

Вилкоксона). Таким образом, для всех пробных площадей распределение остатков вытянуто в правую сторону, что свидетельствует о недооценке значений с помощью кривой Хугерсхоффа. При визуальном анализе графиков (рис. 2-4) недооценка ШГК особенно заметна для тех лет, где ожидается максимум прироста. Выявленная особенность объясняется тем, что исследуемая характеристика (ШГК) не ограничена сверху, но ограничена снизу, так как ШГК не может принимать отрицательные значения. Классическим решением обозначенной проблемы является логарифмическая трансформация исследуемой характеристики кольца. В настоящей работе логарифмическая трансформация не проводилась, так как диаграммы рассеяния, полученные в ее результате, меньше подходят для анализа с использованием кривой Хугерсхоффа, например, менее выражено экспоненциальное снижение ШГК после достижения максимума прироста.

Наибольшая ожидаемая максимальная ШГК (I_{max}) получена на нижнем и среднем уровне юго-восточного склона хребта Зигальга (рис. 5а, табл. 2). Значения максимальной ШГК, достигаемые на этих уровнях, значительно отличаются от оценок максимальной ШГК для всех остальных хребтов и участков, вероятно, этому способствует высокая инсоляция южного склона. Однако на юго-западном профиле Таганая получены низкие значения I_{max} , по всей видимости, на этом хребте ключевую роль в ограничении радиального роста играет ветер (таб. 1). Верхние границы доверительных интервалов I_{max} (рис. 5а, таб. 2) нижнего и среднего уровня юго-восточного

склона хребта Зигальга близки к оценкам максимального прироста ели сибирской (~2.5, определено по графику 3d из работы¹⁸) на границе с тундрой и в зоне северной тайги с 1951 по 2000 год в республике Коми.

Постепенное уменьшение I_{max} вдоль профиля получено только на хребте Нары (различия значимы между нижним и верхним уровнями), где, как было сказано выше, заселение всех высотных уровней началось приблизительно в одно время и различия параметров РКР в большей степени объясняются условиями среды. Кроме этого, хребет Нары выделяется по году ожидаемого максимального прироста (рис. 5б): на среднем уровне он наступает значительно позже по сравнению со средними уровнями других хребтов; аналогично на нижнем уровне, но различия не значимы при сравнении с северо-западным склоном хребта Зигальга. Отметим, что в работе¹¹ максимальный прирост ели в северной тайге и на границе с тундрой тоже наблюдался после 40 лет, при этом в условиях южной и центральной тайги первый пик прироста был выявлен до 20 лет. Таким образом, поздний выход на максимальные значения РКР среднего и нижнего уровня хребта Нары может быть индикатором неблагоприятных условий произрастания.

Три других рассматриваемых параметра (рис. 5в-д), а именно, ожидаемый минимум ШГК (I_{min}), ожидаемая амплитуда ШГК ($I_{max}-I_{min}$) и параметр вогнутости кривой (c), напрямую или косвенно связаны с нижней асимптотой РКР. Так как в настоящее время еще происходит заселение ели в горную тундру, доверительный интервал I_{min} половины уровней не полностью лежит выше 0. В связи с этим затруднительно делать выводы о различиях местообитаний по

¹⁸Lopatin E., Kolström T. Spiecker H. Long-term trends in radial growth of Siberian spruce and

Scots pine in Komi Republic (northwestern Russia). Boreal Env. Res. 2008; 13: 539–552.

параметрам I_{min} , $I_{max}-I_{min}$ и c . Так, границы доверительных интервалов параметра вогнутости c (рис. 5д) повышаются при увеличении высотного уровня, но в большинстве случаев различия не являются значимыми.

Ранее проводились исследования⁵, направленные на выявление связи параметров РКР и густоты древостоя. В настоящей работе были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между медианными оценками параметров РКР и густотой древостоя (особей/гектар, рис. 5): ни для одного из параметров не получен значимый коэффициент корреляции. Отметим, что в работе Наурзбаева и др.⁴ параметр c не анализировался и был принят характерным для каждого участка. В нашем случае связь между параметром c и густотой древостоя могла быть не выявлена из-за искажения оценок c , так как не на каждом уровне РКР вышла на нижнюю асимптоту (рис. 5д, табл. 2).

Также отметим, что аппроксимация кривой Хугерсхоффа может быть применена не только к облаку точек из всех измерений некоторого высотного уровня, но и к отдельным деревьям с последующим усреднением параметров. Полученные параметры кривых могут быть использованы для классификации особей в качестве альтернативы более субъективному подходу [5].

Выводы

1. Ожидаемая ширина годичных колец ели сибирской на Южном Урале описана с

помощью кривой Хугерсхоффа, где радиальный прирост зависит от возраста. Форма этой кривой позволяет учесть прямую зависимость от возраста в первых десятилетиях жизни особи, которая затем сменяется на обратную зависимость.

2. Так как в настоящее время происходит заселение ели сибирской на территории горной тундры, не везде полученные региональные кривые достигли минимальных значений. В ряде случаев нельзя оценить даже максимум региональной кривой.

3. Обнаружены близкие значения большинства параметров региональных кривых роста на анализируемых хребтах. Наибольший ожидаемый максимальный прирост на всех уровнях варьируется от 1.0 до 2.2 мм, в большинстве случаев прирост достигает максимальных значений в возрасте от 18 до 38 лет. Среди исключений можно назвать ожидаемый максимальный прирост (от 2.1 до 2.7 мм) на нижних высотных уровнях юго-восточного склона в перевале между горой Поперечная и горой Круглая (хребет Зигальга), что может быть объяснено благоприятными условиями инсоляции и не высокой скоростью ветра, по сравнению с хребтом Таганай. Помимо этого, поздний выход региональных кривых роста на максимальные значения (от 32 до 61 лет) на среднем и нижнем уровнях хребта Нары может быть индикатором неблагоприятных условий произрастания.

Список литературы

1. Хантемиров Р.М. События Мияке: обзор современного состояния исследований. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 174-211. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>.

2. Guiterman C.H., Lynch A.M., Axelson, J.N. dfoR: An R package for detection and analysis of insect defoliation signals in tree rings. *Dendrochronologia*. 2020; 63: 125750. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125750>.
3. Homfeld I.K., Büntgen U., Reinig F., Torbenson M.C.A., Esper J. Application of RCS and signal-free RCS to tree-ring width and maximum latewood density data. *Dendrochronologia*. 2024; 85: 126205. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126205>.
4. Ложкин Г.И., Чижилова Н.А., Тишин Д.В., Насырова Э.И. Региональные кривые роста сосны обыкновенной в местообитаниях разной увлажненности. *Российский журнал прикладной экологии*. – 2023. – Т.3 – С. 22-27. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.22.27>.
5. Strong W. L. *Picea* (spruce) growth rate (mm year⁻¹) changes in southwest Yukon (Canada) since the mid 19th century. *Vegetation History and Archaeobotany*. 2020; 29(1): 91-100. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00737-2>.
6. Helama S., Herva H., Arppe L., Gunnarson B., Frank T., Holopainen J., Nöjd P., Mäkinen H., Mielikäinen K., Sutinen R., Timonen M., Uusitalo J., Oinonen M. Disentangling the Evidence of Milankovitch Forcing From Tree-Ring and Sedimentary Records. *Front. Earth Sci*. 2022; 10: 871641. – DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.871641>.
7. Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Анатомоморфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал). *Лесотехнический журнал*. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 294-309. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>.
8. Masson-Delmotte V., et al. (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. United Kingdom, NY, 2021: 3–32. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
9. Шиятов С.Г., Моисеев П.А., Григорьев А.А. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2020. – 191 с.
10. Zhang P., Liang Y., Liu B. Ma T., Wu M.M. A coupled modelling framework for predicting tree species' altitudinal migration velocity in montane forest. *Ecol. Model*. 2023; 484: 110481. – <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110481>.
11. Körner C. The cold range limit of trees. *Trends Ecol. Evol*. 2021; 36: 979-989. – <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.011>.
12. Григорьев А.А., Шалаумова Ю.В., Терентьева М.В., Вьюхин С.О., Балакин Д.С., Моисеев П.А. Горные тундры Южного Урала: современное распространение и угроза исчезновения в XXI веке. *Географическая среда и живые системы*. – 2024. – № 3. – С. 26-46. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-3-26-46>.
13. Grigoriev A.A., Mikhailov Y.E., Shalaumova Y.V., V'yukhin S.O., Balakin D.S., Ermakov A.I., Terent'eva, M.V., Erokhina O.V., Moiseev P.A., Kudryavtsev P.P. Upward Expansion of Trees and Shrubs Leads to Alpine Tundra Contraction and Local Extinction of Species in the Southern Urals. *Ecosystems*. 2025; 28(3). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-025-00973-w>.
14. Григорьев А.А., Ложкин Г.И., Вьюхин С.О., Чижилова Н.А., Кудрявцев П.П. Моделирование и прогнозирование динамики верхней границы леса на хребте Зигальга (Южный Урал). *Географическая среда и живые системы*. – 2025. – № 3. – С. 32-51. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2025-3-32-51>.

15. Григорьев А.А., Клям Р.С., Вьюхин С.О., Громов А.М., Балакин Д.С., Воробьев И.Б., Шалаумова Ю.В. Пространственно-временная динамика древесной и кустарниковой растительности в горную тундру Дальнего Тагана (Южный Урал). Леса России и хозяйство в них. – 2023. – № 3 (86). – С. 28-38. – DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.3.86.004>.
16. Hengl T., Parente L. Long-term MODIS LST day-time and night-time temperatures, sd and differences at 1 km based on the 2000-2020 time series (Version 1.1) [Электронный ресурс]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458406> (дата обращения: 07.12.2025).
17. Hengl T., Parente L. Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multisource average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007–2021, CHELSA Climate and WorldClim (Version 0.3) [Электронный ресурс]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458580> (дата обращения: 07.12.2025).
18. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., Carrión-Mero P., Rivera-Torres H., Sadeck L., Adami M. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. Remote Sens. 2023; 15: 3675. – <https://doi.org/10.3390/rs15143675>.
19. Pinheiro J, Bates D, R Core Team. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-164. 2023. – URL: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
20. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. – URL: <https://www.R-project.org>.
21. Kostanek J., Karolczak K., Kuliczowski W., Watala C. Bootstrap Method as a Tool for Analyzing Data with Atypical Distributions Deviating from Parametric Assumptions: Critique and Effectiveness Evaluation. Data 2024; 9 (95). – <https://doi.org/10.3390/data9080095>.

References

1. Hantemirov R. M. *Sobytiya Miyake: obzor sovremennogo sostoyaniya issledovaniy. Lesotekhnicheskii zhurnal* [Miyake events: a review of the state-of-the-art] Forestry Engineering journal, 2023, Vol. 13, №. 4 (52), part 2: 174-211. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/23>.
2. Guiterman C.H., Lynch A.M., Axelson, J.N. dfoR: An R package for detection and analysis of insect defoliation signals in tree rings. Dendrochronologia. 2020; 63: 125750. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125750>.
3. Homfeld I.K., Büntgen U., Reinig F., Torbenson M.C.A., Esper J. Application of RCS and signal-free RCS to tree-ring width and maximum latewood density data. Dendrochronologia. 2024; 85: 126205. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126205>.
4. Lozhkin G.I., Chizhikova N.A., Tishin D.V., Nasyrova E.I. *Regional'nye krivye rosta sosny obyknovенnoj v mestoobitaniyakh raznoj uvlazhnennosti. Rossijskij zhurnal prikladnoj ehkologii* [Regional growth curves of Scots pine in habitats with different moisture content]. Russian Journal of Applied Ecology, 2023; 3: 22–27. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.3.22.27>.
5. Strong W. L. Picea (spruce) growth rate (mm year^{–1}) changes in southwest Yukon (Canada) since the mid 19th century. Vegetation History and Archaeobotany. 2020; 29(1): 91-100. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00737-2>.
6. Helama S., Herva H., Arppe L., Gunnarson B., Frank T., Holopainen J., Nöjd P., Mäkinen H., Mielikäinen K., Sutinen R., Timonen M., Uusitalo J., Oinonen M. Disentangling the Evidence of

- Milankovitch Forcing From Tree-Ring and Sedimentary Records. *Front. Earth Sci.* 2022; 10: 871641. – DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.871641>.
7. Chukina N.V., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. *Anatomomorfologicheskie i biokhimicheskie pokazateli Picea obovata Ledeb. v posadkakh na drazhnom otvale posle zolotodobychi (Srednij Ural). Lesotekhnicheskii zhurnal.* [Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining (Middle Urals)]. *Forestry Engineering journal*, 2025. Vol. 15, №. 4 (60): 294-309. – <https://doi.org/DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>.
 8. Masson-Delmotte V., et al. (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* United Kingdom, NY, 2021: 3–32. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
 9. Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Grigor'ev A.A. *Fotomonitoring drevesnoj i kustarnikovej rastitel'nosti v vysokogor'yakh Yuzhnogo Urala za poslednie 100 let* [Photomonitoring of trees and shrubs in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UMC UPI, 2020. 191 p.
 10. Zhang P., Liang Y., Liu B. Ma T., Wu M.M. A coupled modelling framework for predicting tree species' altitudinal migration velocity in montane forest. *Ecol. Model.* 2023; 484: 110481. – <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110481>.
 11. Körner C. The cold range limit of trees. *Trends Ecol. Evol.* 2021; 36: 979-989. – <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.011>.
 12. Grigoriev A.A., Shalaumova Yu.V., Terentyeva M.V., Vyukhin S.O., Balakin D.S., Moiseev P.A. *Gornye tundry Yuzhnogo Urala: sovremennoe rasprostranenie i ugroza ischeznoveniya v xxi veke. Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy.* [Alpine tundras of the Southern Urals: current distribution and threat of extinction in the 21 st century]. *Geographical Environment and Living Systems*, 2024; 3: 26–46. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-3-26-46>.
 13. Grigoriev A.A., Mikhailov Y.E., Shalaumova Y.V., V'yukhin S.O., Balakin D.S., Ermakov A.I., Terent'eva, M.V., Erokhina O.V., Moiseev P.A., Kudryavtsev P.P. Upward Expansion of Trees and Shrubs Leads to Alpine Tundra Contraction and Local Extinction of Species in the Southern Urals. *Ecosystems*. 2025; 28(3). – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-025-00973-w>.
 14. Grigoriev A.A., Lozhkin G.I., Vyukhin S.O., Chizhikova N.A., Kudryavtsev P.P. *Modelirovanie i prognozirovanie dinamiki verkhnej granicy lesa na khrebtie Zigal'ga (Yuzhnyj Ural). Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy.* [Modeling and forecasting the dynamics of the upper forest limit on the Zigalga ridge (Southern Urals)]. *Geographical Environment and Living Systems*, 2025; 3: 32–51. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2025-3-32-51>.
 15. Grigoriev A.A., Klyam R.S., Vyukhin S.O., Gromov A.M., Balakin D.S., Vorobyov I.B., Shalaumova Y. V. *Prostranstvenno-vremennaya dinamika drevesnoj i kustarnikovej rastitelnosti v gornuyu tundru Dalnego Taganaya (Yuzhnyj Ural). Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh.* [Spatial-temporal dynamics of tree and shrub vegetation in the mountain tundra of Dalniy Taganay (Southern Urals)]. *Forests of Russia and economy in them*, 2023; 3 (86): 28-38. – DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.3.86.004>.
 16. Hengl T., Parente L. Long-term MODIS LST day-time and night-time temperatures, sd and differences at 1 km based on the 2000-2020 time series (Version 1.1) [Online resource]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458406> (date of access: 07.12.2025).

17. Hengl T., Parente L. Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multisource average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007–2021, CHELSA Climate and WorldClim (Version 0.3) [Online resource]. Zenodo, 2022. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458580> (date of access: 07.12.2025).
18. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., Carrión-Mero P., Rivera-Torres H., Sadeck L., Adami M. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sens.* 2023; 15: 3675. – <https://doi.org/10.3390/rs15143675>.
19. Pinheiro J, Bates D, R Core Team. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. *R package* version 3.1-164. 2023. – URL: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
20. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. – URL: <https://www.R-project.org>.
21. Kostanek J., Karolczak K., Kuliczowski W., Watala C. Bootstrap Method as a Tool for Analyzing Data with Atypical Distributions Deviating from Parametric Assumptions: Critique and Effectiveness Evaluation. *Data* 2024; 9 (95). – <https://doi.org/10.3390/data9080095>.

Информация об авторах

✉ *Ложкин Григорий Иванович* (г. Казань) – ассистент кафедры моделирования экосистем Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета; инженер-исследователь лаборатории дендрохронологии Института географии Российской академии наук; e-mail: lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658.

Григорьев Андрей Андреевич (г. Екатеринбург) – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук; e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654.

Вьюхин Сергей Олегович (г. Екатеринбург) – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук; e-mail: sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878.

Чижикова Нелли Александровна (г. Казань) – кандидат биологических наук, доцент кафедры моделирования экосистем Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета; e-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207.

Information about the authors

✉ *Grigory I. Lozhkin* (Kazan) – Assistant, Department of Ecosystem Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University; Research Engineer, Laboratory of Dendrochronology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; e-mail: lozhkin.grig@gmail.com; ORCID: 0009-0004-0962-3658.

Andrey A. Grigoriev (Ekaterinburg) – PhD (Agriculture), Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: grigoriev.a.a@ipae.uran.ru; ORCID: 0000-0002-7446-0654.

Sergey O. Vyukhin (Ekaterinburg) – PhD (Agriculture), Junior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: sergey.vyuhin@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7173-4878.

Nelli A. Chizhikova (Kazan) – PhD (Biology), Assoc. Prof., Department of Ecosystem Modeling, Institute of Ecology, Biotechnology, and Nature Management, Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: nelly.chizhikova@stud.kpfu.ru; ORCID: 0000-0002-9969-9207.



Особенности строения лесных культур сосны, созданных различной густотой посадки

Михаил Д. Мерзленко¹, md.merzlenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Владимир А. Брынцев² , bryntsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

Анна А. Коженкова², kozhenkovaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., 143030, Российская Федерация

²Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, 127276, Российская Федерация

Проведено изучение особенностей строения 40-летних лесных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), созданных различной густотой посадки на территории зоны хвойно-широколиственных лесов Русской равнины. Актуальность работы обусловлена отсутствием подобных исследований для искусственных дендроценозов. Проведен анализ структуры лесных культур сосны, основанный на результатах ранжирования насаждений по классам Крафта. С увеличением густоты посадки происходят не только изменения таксационных показателей, но и характера дифференциации качественного перераспределения деревьев разных классов Крафта: уменьшается доля деревьев высших классов (I и II) и увеличивается доля деревьев низших классов (IV и V). Установлено, что в 40-летних культурах сосны редуциционные числа как по высоте, так и по диаметру, а также относительные высоты строго дифференцированы по классам Крафта. Значения величин редуциционных чисел не зависят от густоты посадки, но имеют тенденцию их уменьшения от I к V классу. С увеличением густоты посадки для деревьев всех классов Крафта свойственно увеличение относительных высот. Причём наиболее сильно это проявляется в культурах сосны, произрастающих в свежем бору. Расчленение на ранговую структуру по классам роста и развития Крафта отражает функциональную иерархию в строении лесных культур.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, лесные культуры, густота посадки, классы Крафта, редуциционные числа, относительная высота

Финансирование: Работа В.А. Брынцева, А.А. Коженковой выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН по теме № 126020916823-0.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мерзленко, М. Д. Особенности строения лесных культур сосны, созданных различной густотой посадки / М. Д. Мерзленко, В. А. Брынцев, А. А. Коженкова // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 88-97. – Библиогр.: с. 95-97 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/6>.

Поступила 23.12.2025. Пересмотрена 02.03.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Article

Structural features of pine forest crops created at various planting densities

Michail D. Merzlenko¹, md.merzlenko@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

Vladimir A. Bryntsev²✉, bryntsev@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

Anna A. Kozhenkova², kozhenkovaa@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹*Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, 21, Sovetskaya st., Uspenskoe, Moscow Region, 140030, Russian Federation*

²*Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin Russian Academy of Sciences, st. Botanicheskaya 4, Moscow, 127276, Russian Federation*

Abstract

This study examined the structural features of 40-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest stands created at varying planting densities in the mixed-coniferous-broadleaf forest zone of the Russian Plain. The relevance of this study is due to the lack of similar studies for artificial dendrocenoses. An analysis of the pine forest stand structure was conducted based on the results of ranking the stands according to Kraft classes. With increasing planting density, not only changes in the taxation indicators but also in the nature of differentiation in the qualitative redistribution of trees of different Kraft classes occur: the proportion of trees of higher classes (I and II) decreases, and the proportion of trees of lower classes (IV and V) increases. It was found that in 40-year-old pine stands, reduction numbers for both height and diameter, as well as relative heights, are strictly differentiated by Kraft classes. Reduction numbers are independent of planting density but tend to decrease from class I to V. With increasing planting density, trees of all Kraft classes tend to increase in relative height. This is most pronounced in pine stands growing in fresh pine forests. The rank structure of Kraft growth and development classes reflects the functional hierarchy in the structure of forest stands.

Keywords: *Scots pine, forest crops, planting density, Kraft classes, reduction numbers, relative height*

Funding: The research was V.A. Bryntsev, A.A. Kozhenkova carried out within the framework of the state assignment of Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences on topic № 126020916823-0.

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

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

For citation: Merzlenko M. D., Bryntsev V. A., Kozhenkova A. A. (2026). Structural features of pine forest crops created at various planting densities. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 88-97 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/6>.

Received 23.12.2025. **Revised** 02.03.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) имеет самый большой ареал в роде *Pinus* L. простирающийся через всю Евразию. Она является основополагающим видом разнообразных лесных экосистем и демонстрирует большое экологическое и формовое разнообразие [1], сохраняя при этом, на

всем протяжении своего ареала, генетическое единство [2, 3, 4]. Хозяйственное значение сосны обыкновенной трудно переоценить. На всей территории своего ареала она является ценнейшим лесообразователем [5].

Вопросы густоты посадки лесных культур насчитывают почти 300-летнюю давность их

изучения [6], но остаются актуальными для лесного хозяйства и в настоящее время [7, 8, 9]. Численность древесных растений существенно влияет на рост и производительность формирующегося древостоя [10, 11, 12], морфологию деревьев [13]. При этом густота посадки влияет не только на таксационные показатели лесных культур, но и на ценоотическую структуру искусственных насаждений [14, 15, 16] и экосистему в целом [17, 18, 19]. В частности, это чётко отражается на ранговой характеристике насаждений¹⁹, а также хорошо фиксируемой классами роста и развития Крафта.

Классификация Крафта²⁰ базируется на свойственной природе леса дифференциации деревьев по степени их господства и угнетения.

Она находит применение не только в лесоведении, но и в практике лесного хозяйства²¹. Например, используется в ходе выполнения рубок ухода по низовому методу, когда удаляются деревья V и, частично, IV классов, а сбор семян осуществляется с деревьев I, II и III классов, дающих максимальное количество семенного материала²² [20].

Целью настоящих исследований являлось выявление особенностей строения культур сосны разной густоты на предмет специфики значений редуционных чисел по высоте и диаметру, а также относительных высот в разрезе разных классов Крафта.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были взяты экспериментальные культуры сосны обыкновенной 40-летнего возраста, произрастающие на территории Русской равнины в свежем бору Муромцевского лесничества (Владимирская обл.) и свежей сложной субори Истринского лесничества (Московская обл.). В

каждом из объектов экспериментальных культур содержится по три участка с разной густотой посадки: 5; 8; и 11 тыс. сеянцев на 1га (Муромцевское лесничество); 2; 4 и 8 тыс. сеянцев на 1га (Истринское лесничество). Во всех участках заложены пробные площади согласно ОСТ 56-69-83²³. Ни рубок ухода, ни санитарных рубок на протяжении 40-летнего периода роста лесных культур не проводилось.

В ходе перечислительной таксации у каждого дерева замерялись диаметр и высота, и фиксировался класс роста и развития по Крафту. Это позволило рассчитать редуционные числа для каждого класса Крафта как по высоте, так и по диаметру, в %.

$$R_h = h/H \cdot 100;$$

где R_h – редуционное число по высоте конкретного класса; h , H – средние высоты для конкретного класса и насаждения соответственно.

Аналогично рассчитывались редуционные числа по всем классам Крафта и по диаметру.

Помимо редуционных чисел в разрезе каждого класса Крафта также фиксировались относительные высоты (H/D) по Я.С.Медведеву²⁴.

На всех пробных площадях по каждому из вариантов густоты посадки рассчитывалось долевое участие (%) деревьев каждого класса Крафта в насаждении.

Запас стволовой древесины – M м³/га, рассчитывался по формуле:

$$M = H \cdot F \cdot G;$$

где:

H – средняя высота насаждения, м;

F – видовое число;

G – сумма площадей сечений, м²/га.

¹⁹ Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 168 с.

²⁰ Kraft G. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klind worths Verlag, 1884. 144 s.

²¹ Морозов Г.Ф. Основания учения о лесе: лекции, читанные в Таврическом Университете. Репринтное издание. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. 330 с.; Burschel P., Huss Jür., Grundriß des Waldbaus. Berlin: Parey Buchverlag. 1997. 487 s.

²² Соболев А.Н. Плодоношение лесных насаждений // Плодоношение лесных насаждений. СПб.: Типо-лиграфия М.П. Фроловой, 1908. С. 1–62.

²³ ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные, методы закладки. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 59 с.

²⁴ Медведев Я.С. К учению о влиянии света на развитие древесных стволов. // Лесной журнал 1884. Вып. 5 и 6. С. 326-373.

Результаты и обсуждение

С увеличением значения густоты посадки на экспериментальных участках 40-летних лесных культур сосны обыкновенной снижаются все

таксационные показатели насаждения и как итог производительность, т.е. запас (табл. 1 и 2)

Таблица 1

Таксационная характеристика 40-летних культур сосны обыкновенной разной густоты в условиях свежего бора (A₂)

Table 1

Inventory characteristics of 40-year-old Scots pine stands of varying density in fresh pine forest conditions (A₂)

Показатели Indicators	Густота посадки, тыс. шт./га Planting density, thousand pcs/ha		
	5	8	11
Средняя высота, м Average height, m	15,1	13,2	10,9
Средний диаметр, см Average diameter, cm	13,6	10,3	8,4
Класс бонитета Bonitet class	I	II	III
Сумма площадей сечений деревьев, м ² /га Sum of tree cross-sectional areas, m ² /ha живых alive сухостоя dead wood			
	35,6	36,5	28,5
	1,5	2,1	1,2
Густота стояния деревьев, шт/га Tree density, pcs/ha	2230	3950	4367
Сохранность, % Preservation, %	44,6	49,4	39,7
Запас стволовой древесины, м ³ /га Volume of stem wood, m ³ /ha живых деревьев living trees сухостоя dead wood			
	289	260	181
	10	12	7

Таблица 2

Таксационная характеристика 40-летних культур сосны обыкновенной разной густоты в условиях свежей сложной субори (C₂)

Table 2

Inventory characteristics of 40-year-old Scots pine stands of varying densities in fresh complex subforest conditions (C₂)

Показатели Indicators	Густота посадки, тыс. шт./га Planting density, thousand pcs/ha		
	2	4	8
Средняя высота, м Average height, m	21,0	21,4	20,8
Средний диаметр, см Average diameter, cm	22,2	20,0	19,7
Класс бонитета Bonitet class	Ia	Ia	Ia
Сумма площадей сечений деревьев, м ² /га Sum of tree cross-sectional areas, m ² /ha живых alive сухостоя dead wood			
	31,4	30,8	29,9
	3,8	8,0	5,0
Густота стояния деревьев, шт/га Tree density, pcs/ha	781	980	941
Сохранность, % Preservation, %	39,1	24,5	11,8
Запас стволовой древесины, м ³ /га Volume of stem wood, m ³ /ha живых деревьев living trees сухостоя dead wood			
	308	302	291
	36	74	43

Как видно из таблиц 1 и 2, очень существенно снижаются значения среднего диаметра, а также средней высоты. То, что снижается средняя высота с увеличением густоты лесных культур, является признанным фактом²⁵. А это приводит и к снижению класса бонитета, причем наиболее существенно в бедных лесорастительных условиях – A_2 . Отпад к 40-летнему возрасту лесных культур имеет тенденцию увеличиваться с повышением густоты посадки. Самая низкая величина сохранности наблюдается в свежих сложных суборах (C_2). Так

при одной и той же густоте посадки равной 8 тыс. шт/га сохранность в C_2 в 4 раза меньше, чем в A_2 .

В целом лесоводственный эффект (запас древесины растущей части насаждения в сочетании с классом бонитета и значением среднего диаметра) в 40-летнем возрасте дал следующие наилучшие результаты исходя из густоты посадки: для A_2 – 5 тыс. шт. на 1 га; в C_2 – 2 и 4 тыс. шт на 1 га.

Дифференциация [21] зависит от густоты посадки лесных культур (табл. 3).

Таблица 3

Дифференциация в чистых по составу 40-летних культурах сосны обыкновенной в зависимости от густоты посадки

Table 3

Differentiation in pure 40-year-old Scots pine stands depending on planting density

Густота посадки, тыс. шт./га Planting density, thousand pcs/ha	Распределение деревьев по классам Крафта, % Distribution of trees by Kraft classes, %				
	I	II	III	IV	V
Лесорастительные условия свежего бора (A_2) Forest growth conditions of fresh pine forest (A_2)					
5	16	20	22	22	20
8	11	17	21	27	24
11	9	14	19	28	30
Лесорастительные условия свежей сложной субори (C_2) Forest growth conditions of fresh complex subori (C_2)					
2	15	21	38	18	8
4	10	25	31	23	11
8	8	19	27	28	18

Как видно из таблицы 3, с увеличением густоты посадки происходит качественное перераспределение деревьев разных классов, выражающее в уменьшении числа особей высших классов (I и II) и увеличение низших (IV и V) классов Крафта. В наших экспериментальных культурах сосны с разной густотой посадки это отмечается для свежего бора начиная с густоты посадки 8 тыс. шт/га, а в богатых лесорастительных условиях свежей сложной субори – с 4-х тыс. шт/га. Эта особенность свидетельствует о том, что в богатых лесорастительных условиях процессы роста и развития древесного сообщества идут быстрее (интенсивнее). Это подтверждается меньшей сохранностью деревьев сосны в свежей сложной субори по сравнению со свежим бором (табл. 1 и 2).

Явное превалирование деревьев IV и V классов, т.е. когда они в доленом отношении

превышают 50% деревьев насаждения, создает резерв отпада. Это фиксируется в свежем бору для лесных культур, созданных густотой посадки 8 и 11 тыс. шт/га, где совокупность деревьев низших классов Крафта составляет соответственно 51 и 58%.

Наилучшее состояние лесных культур имеет место в свежей сложной субори при густоте посадки 4 и 2 тыс. шт/га. В этих 40-летних насаждениях максимум деревьев приходится на третий класс (табл. 3), а доленое распределение всей совокупности деревьев по пяти классам соответствует кривой нормального распределения.

В лесных культурах сосны одного и того же возраста редукционные числа по высоте и диаметру строго дифференцированы по классам Крафта (табл.4).

²⁵ Рубцов В.И., Новосельцева А.И., Попов В.К., Рубцов В.В. Биологическая продуктивность сосны в лесостепной зоне. М.: Наука, 1976. 223 с.

Таблица 4

Значения редуционных чисел по высоте (R_h) и по диаметру (R_d) в разрезе классов Крафта в 40-летних культурах сосны

Table 4

The values of reduction numbers for height (R_h) and diameter (R_d) in the context of Kraft classes in 40-year-old pine stands

Показатели Indicators	Густота посадки, тыс. шт./га Planting density, thousand pcs/ha	Классы Крафта Kraft classes				
		I	II	III	IV	V
Лесорастительные условия свежего бора (A ₂) Forest growth conditions of fresh pine forest (A ₂)						
R _h	5	123	115	106	99	77
	8	120	114	110	101	80
	11	129	119	114	98	73
	Среднее average value	124	116	110	99	77
R _d	5	152	134	110	90	57
	8	161	140	120	94	63
	11	170	139	117	87	60
	Среднее average value	161	138	116	90	60
Лесорастительные условия свежей сложной субори (C ₂) Forest growth conditions of fresh complex subori (C ₂)						
R _h	2	107	102	98	95	85
	4	107	100	99	91	85
	8	110	103	100	96	80
	Среднее average value	108	102	99	94	83
R _d	2	132	113	96	83	68
	4	128	112	98	86	73
	8	136	118	103	88	73
	Среднее average value	132	114	99	86	71

Причем, как видно из таблицы 4, вне зависимости от густоты посадки редуционные числа, как по высоте, так и по диаметру, в пределах каждого класса имеют очень близкие значения. Это указывает на общность процессов рангового строения в искусственных насаждениях, не зависящих не только от густоты посадки и густоты стояния, но и от условий местопроизрастания. Ранжирование по классам Крафта можно

рассматривать как закон строения насаждения, обеспечивающий функционирование древесного сообщества. Ранговая иерархия – это основа существования чистого по составу искусственного насаждения.

Значения относительных высот в разрезе классов Крафта представлены в таблице 5.

Значения относительных высот у разных классов Крафта

Table 5

Relative height values for different Kraft classes

Густота посадки, тыс. шт./га Planting density, thousand pcs/ha	Классы Крафта Kraft classes				
	I	II	III	IV	V
Лесорастительные условия свежего бора (A_2) Forest growth conditions of fresh pine forest (A_2)					
5	89	95	107	122	152
8	96	105	117	137	163
11	99	111	126	146	170
Лесорастительные условия свежей сложной субори (C_2) Forest growth conditions of fresh complex subori (C_2)					
2	77	86	96	108	129
4	87	96	108	114	125
8	90	99	103	116	119

Как видно из таблицы 5, в обоих типах условий местопроизрастания (A_2 и C_2) с увеличением густоты посадки для деревьев всех классов Крафта свойственно увеличение относительных высот. Причем наиболее сильно это проявляется в культурах сосны произрастающих в свежем бору.

Считается²⁶, что в лесных культурах сосны относительные высоты деревьев не должны превышать 115. Иначе деревья, у которых относительная высота больше 115, в силу своей ослабленности являются кандидатами на отмирание, что особенно свойственно деревьям V класса, как в культурах свежего бора, так и в свежей сложной субори (табл. 5). Диспропорция в соотношении высот и диаметров, приводящая к ослаблению деревьев наиболее отчетливо выражена в бедных лесорастительных условиях свежего бора. Так неблагоприятные величины относительных высот в A_2 по всем значениям экспериментальных густот имеют не только деревья IV и V классов

Крафта, но и деревья III класса с густотой посадки лесных культур 11 и даже 8 тыс. шт/га.

Выводы

1. Лесные культуры, созданные различной густотой посадки, имеют различия не только в таксационных показателях, но и в особенностях строения насаждений.

2. Расчленение на ранговую структуру по классам роста и развития Крафта отражает функциональную иерархию в строении лесных культур.

3. В 40-летних культурах сосны редуccionные числа, как по высоте, так и по диаметру, а также относительные высоты, строго дифференцированы по классам роста и развития Крафта.

4. Значение величин редуccionных чисел не зависят от густоты посадки, но имеют тенденцию их уменьшения от I к V классу.

²⁶ Рубцов В.И. Рост и биологическая продуктивность 18-летних культур сосны разной

густоты. // Экспресс информация ЦБНТИлесхоза. 1977. Вып. 3. 27 с.

Список литературы

1. Брынцев В.А. Эндогенная и индивидуальная изменчивость морфометрических показателей шишек сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2025. – Т. 29. – № 5. – С. 62–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-5-62-74.
2. Hall D., Zhao W., Wennström U., Gull B.A., Wang X.-R. Parentage and relatedness reconstruction in *Pinus sylvestris* using genotyping-by-sequencing. Heredity. 2020; 124: 633–646. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0302-3>.
3. Bruxaux J., Zhao W., Hall D., Curtu A.L., Androsiuk P., Drouzas A.D., Gailing O., Konrad H., Sullivan A.R., Semerikov V., Wang X.-R. Scots pine – panmixia and the elusive signal of genetic adaptation. New Phytologist. 2024; 243: 1231–1246. DOI: 10.1111/nph.19563.
4. Danusevičius D., Rajora O.P., Kavaliauskas D. et al. Stronger genetic differentiation among within-population genetic groups than among populations in Scots pine provides new insights into within-population genetic structuring. Sci Rep. 2024; 14: 2713. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52769-y>.
5. Brichta J., Vacek S., Vacek Z., Cukor J., Mikeska M., Bílek L., Šimůnek M., Gallo J., Brabec P. Importance and potential of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in 21st century. Central European Forestry Journal. 2023; 69: 3-20. DOI: 10.2478/forj-2022-0020.
6. Мерзленко М.Д. Очерки о лесокультурной науке. – М.: Издательский Дом Рученькиных, 2024. – 114 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83220891>.
7. Gabira M.M., Girona M.M., DesRochers A., Kratz D., da Silva R.B.G., Duarte M.M., de Aguiar N.S., Wendling I. The impact of planting density on forest monospecific plantations: An overview. Forest Ecol. Manag. 2023; 534: 120882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120882>.
8. Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušienė L., Aleinikovienė J., Škėma M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities. Forests. 2020; 11: 587. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11050587>.
9. Пшеничникова Л. С. Динамика роста и продуктивность разнотелных культур ели в южной тайге Средней Сибири. Хвойные бореальной зоны. – 2020. – Т. 38. – № 3-4. – С. 107-114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44127968>.
10. Kremer K., Jonsson B.-G., Tavares M.F., Bauhus J. Effects of planting density on the performance of reforestation and afforestation plantings in temperate and boreal forests: a systematic review. Restoration Ecology. 2025; 33: 5. DOI: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.70103/supinfo>.
11. Пшеничникова Л.С., Собачкин Д.С., Собачкин Р.С. Лесоводственная оценка 35-летних культур сосны, лиственницы, ели разной густоты в южной тайге средней Сибири. Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2021. – № 60. – С. 61-63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47200121>.
12. Пшеничникова Л.С., Онучин А.А., Собачкин Р.С., Петренко А.Е. Особенности роста сосновых культур разной густоты в условиях южной тайги Сибири. Сибирский лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 24–33. DOI: 10.15372/SJFS20220303.
13. Осипенко А.Е., Залесов С.В. Формирование морфологии деревьев культивируемых сосновых древостоев. Изв. вузов. Лесн. журн. – 2024. – № 2. – С. 105–117. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-105-117>.
14. Залесова Е.С., Ананьев Е.М., Осипенко А.Е., Шубин Д.А., Терехов Г.Г. Влияние густоты посадки на устойчивость искусственных сосновых насаждений. Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23. – № 1. – С. 22–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-22-27.
15. Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). Forests. 2024; 15: 233. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15020233>.
16. Ganbaatar B., Jamsran T., Gradel A., Sukhbaatar G. Assessment of the Effects of Thinnings in Scots Pine Plantations in Mongolia: a Comparative Analysis of Tree Growth and Crown Development Based on Dominant Trees. Forest Science and Technology. 2021; 17: 3: 135–143. DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2021.1963326>.
17. Zhang, Y., Zeng, D.H., Sheng, Z. et al. Stand density influences soil organic carbon stocks and fractions by mediating soil biochemical properties in Mongolian pine plantations. Plant Soil. 2025; 513: 2309–2323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07317-6>.
18. Selvalakshmi S., Vasu D., Yang X. Planting density affects soil quality in the deep soils of pine plantations. Applied Soil Ecology. 2022; 178: 104572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104572>.
19. Bai Y.-F., Shen Y.-Y., Jin Y.-D., Hong Y., Liu Y.-Y Li., Y.-Q., Liu R., Zhang Z.-W., Jiang Ch.-Q., Wang Y.-J. Selective thinning and initial planting density management promote biomass and carbon storage in a chronosequence of evergreen conifer plantations in Southeast China. Global Ecology and Conservation. 2020; 24: e01216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01216>.

20. Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабищ Н.А. Лесные культуры. – М.: Издательство Юрайт, 2020. – В 2 ч. Часть 2. – 260 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43013776>.
21. Мерзленко М.Д. Лес как социум древесного сообщества. – М.: Издательский Дом Рученькиных, 2025. – 88 с.

References

1. Bryntsev V.A. *Endogennaya i individual'naya izmenchivost' morfometricheskikh pokazateley shishek sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.)* [Endogenous and individual variability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) cones morphometric parameters]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2025; vol.29; 5: 62–74. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2025-5-62-74.
2. Hall D., Zhao W., Wennström U., Gull B.A., Wang X.-R. Parentage and relatedness reconstruction in *Pinus sylvestris* using genotyping-by-sequencing. *Heredity*. 2020; 124: 633–646. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-020-0302-3>.
3. Bruxaux J., Zhao W., Hall D., Curtu A.L., Androsiuk P., Drouzas A.D., Gailing O., Konrad H., Sullivan A.R., Semerikov V., Wang X.-R. Scots pine – panmixia and the elusive signal of genetic adaptation. *New Phytologist*. 2024; 243: 1231–1246. DOI: 10.1111/nph.19563.
4. Danusevičius D., Rajora O.P., Kavaliauskas D. et al. Stronger genetic differentiation among within-population genetic groups than among populations in Scots pine provides new insights into within-population genetic structuring. *Sci Rep.* 2024; 14: 2713. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52769-y>.
5. Brichta J., Vacek S., Vacek Z., Cukor J., Mikeska M., Bílek L., Šimůnek M., Gallo J., Brabec P. Importance and potential of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in 21st century. *Central European Forestry Journal*. 2023; 69: 3–20. DOI: 10.2478/forj-2022-0020.
6. Merzlenko M.D. *Ocherki o lesokul'turnoj nauke*. [Essays on Silvicultural Science] M.: Izdatel'skij Dom Ruchen'kinykh.. 2024; 114. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83220891>.
7. Gabira M.M., Girona M.M., DesRochers A., Kratz D., da Silva R.B.G., Duarte M.M., de Aguiar N.S., Wendling I. The impact of planting density on forest monospecific plantations: An overview. *Forest Ecol. Manag.* 2023; 534: 120882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120882>.
8. Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušienė L., Aleinikovienė J., Škėma M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities. *Forests*. 2020; 11: 587. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11050587>.
9. Pshenichnikova L. S. *Dinamika rosta i produktivnost' raznogustotnykh kul'tur eli v yuzhnoj tajge Srednej Sibiri*. [Growth dynamics and productivity of spruce crops of different densities in the southern taiga of Central Siberia] *Khvojnye boreal'noj zony*. 2020; 38; 3–4: 107–114. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44127968>.
10. Kremer K., Jonsson B.-G., Tavares M.F., Bauhus J. Effects of planting density on the performance of reforestation and afforestation plantings in temperate and boreal forests: a systematic review. *Restoration Ecology*. 2025; 33: 5. DOI: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.70103/supinfo>.
11. Pshenichnikova L.S., Sobachkin D.S., Sobachkin R.S. *Lesovodstvennaya otsenka 35-letnikh kul'tur sosny, listvennitsy, eli raznoj gustoty v yuzhnoj tajge srednej Sibiri*. [Forestry assessment of 35-year-old pine, larch, and spruce cultures of varying density in the southern taiga of central Siberia.] *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2021; 60: 61–63. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47200121>.
12. Pshenichnikova L. S., Onuchin A. A., Sobachkin R. S., Petrenko A. E. *Osobennosti rosta sosnovy'x kul'tur raznoj gustoty v usloviyax yuzhnoj tajgi Sibiri*. [The growth specifics of pine crops of various density in the Siberian southern taiga] // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Sib. J. For. Sci.* 2022; 3: 24–33. (In Russ.). DOI: 10.15372/SJFS20220303.
13. Osipenko A.E., Zalesov S.V. *Formirovanie morfologii derev'ev kul'tiviruemykh sosnovykh drevostoev*. [Formation of the morphology of cultivated pine forests] *Izv. vuzov. Lesn. zhurn.* 2024; 2: 105–117. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-105-117>.
14. Zalesova E.S., Ananiev E.M., Osipenko A.E., Shubin D.A., Terekhov G.G. *Vliyanie gustoty posadki na ustoychivost' iskusstvennykh sosnovykh nasazhdeniy* [Planting density effect on artificial pine stands stability]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2019; 23; 1: 22–27. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-22-27.
15. Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*. 2024; 15: 233. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15020233>.
16. Ganbaatar B., Jamsran T., Gradel A., Sukhbaatar G. Assessment of the Effects of Thinnings in Scots Pine Plantations in Mongolia: a Comparative Analysis of Tree Growth and Crown Development Based on Dominant Trees. *Forest Science and Technology*. 2021; 17; 3: 135–143. DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2021.1963326>.
17. Zhang, Y., Zeng, D.H., Sheng, Z. et al. Stand density influences soil organic carbon stocks and fractions by mediating soil biochemical properties in Mongolian pine plantations. *Plant Soil*. 2025; 513: 2309–2323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07317-6>.

18. Selvalakshmi S., Vasu D., Yang X. Planting density affects soil quality in the deep soils of pine plantations. *Applied Soil Ecology*. 2022; 178: 104572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104572>.

19. Bai Y.-F., Shen Y.-Y., Jin Y.-D., Hong Y., Liu Y.-Y Li., Y.-Q., Liu R., Zhang Z.-W., Jiang Ch.-Q., Wang Y.-J. Selective thinning and initial planting density management promote biomass and carbon storage in a chronosequence of evergreen conifer plantations in Southeast China. *Global Ecology and Conservation*. 2020; 24: e01216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01216>.

20. Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A. *Lesny'e kul'tury*. [Forest crops]. V 2 ch. Chast' 2. M.: Izdatel'stvo Yurajt. 2020; 260. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43013776>.

21. Merzlenko M.D. *Les kak socium drevesnogo soobshhestva*. [Forest as a society of tree community]. M.: Izdatel'skij Dom Ruchen'kiny'x. 2025; 88. (in Russ.).

Сведения об авторах

Мерзленко Михаил Дмитриевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник Института лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Российская Федерация, 143030, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>, e-mail: md.merzlenko@mail.ru.

✉ *Брынцев Владимир Альбертович* – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, главный научный сотрудник ГБС РАН, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, Российская Федерация, 127276, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>, e-mail: bryntsev@mail.ru.

Коженкова Анна Альбертовна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, научный сотрудник ГБС РАН, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, Российская Федерация, 127276, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>, e-mail: kozhenkovaa@yandex.ru.

Information about authors

Michail D. Merzlenko – Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Chief Researcher at the Institute of Forestry of the Russian Academy of Sciences, 21, Sovetskaya st., Uspenskoe, Moscow Region, Russian Federation, 140030, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>, e-mail: md.merzlenko@mail.ru.

✉ *Vladimir A. Bryntsev* – Dr. Sci. (Agriculture), associate professor, Chief Scientific Officer of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, st. Botanicheskaya 4, Moscow, 127276, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>, e-mail: bryntsev@mail.ru.

Anna A. Kozhenkova – Cand. Sc. (Agriculture), associate professor, Researcher of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, st. Botanicheskaya 4, Moscow, Russian Federation, 127276, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>, e-mail: kozhenkovaa@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author



Влияние декадных температур весеннего сезона на фенологические сдвиги *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. в условиях урбоэкосистемы (на примере г. Воронежа)

Олег В. Серебряков, o-ser00@mail.ru, 0009- 0006-1171-0368

Наталья В. Яковенко , n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

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

В статье представлены результаты исследований влияния температурных изменений весеннего сезона на фенологические ритмы древесных пород на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях урбанизированной среды г. Воронежа. На основе 4-летних (2021–2024 гг.) фенологических наблюдений на восьми модельных площадках выявлена тенденция к смещению сроков наступления ключевых фаз (распускание листьев, начало цветения) на более ранние даты. С применением корреляционного анализа (метод Пирсона) установлена сильная отрицательная связь между среднемесячными и декадными температурами воздуха весенних месяцев и сроками наступления фенофаз. Наиболее значимое влияние на фенологию изучаемых видов оказывают температуры третьей декады марта и первой-третьей декад апреля. Результаты подтверждают высокую индикаторную роль фенологических наблюдений для оценки климатических изменений и могут быть использованы для адаптации стратегий озеленения городских территорий.

Ключевые слова: фенология, биоиндикация, изменение климата, весенние температуры, *Betula pendula*, *Tilia cordata*, городская среда, Воронеж

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Серебряков, О. В. Влияние декадных температур весеннего сезона на фенологические сдвиги *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. в условиях урбоэкосистемы (на примере г. Воронежа) / О. В. Серебряков, Н. В. Яковенко // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 98-112. – Библиогр.: с. 108-111 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/7>.

Поступила 23.11.2025. **Пересмотрена** 23.12.2025. **Принята** 15.03. 2026. **Опубликована онлайн** 27.03.2026.

Article

Influence of decade temperatures of the spring season on the phenological shifts of *Betula pendula* Roth. and *Tilia cordata* Mill. in the conditions of the urbanoecosystem (using the example of Voronezh city)

Oleg V. Serebryakov, o-ser00@mail.ru, 0009- 0006-1171-0368

Nataliya V. Yakovenko , n.v.yakovenko71@gmail.com, 0000-0003-4203-0040

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

Abstract

The article presents the results of research on the influence of springtime temperature changes on the phenological rhythms of tree species using the example of silver birch (*Betula pendula* Roth.) and small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in the urbanized environment of the city of Voronezh. Based on 4-year (2021-2024) phenological observations at eight model sites, a trend towards shifting the onset of key phases (leaf emergence, flowering) to earlier dates has been revealed. Using correlation analysis (Pearson's method), a strong negative relationship was established between the average monthly and decade-level air temperatures of the spring months and the onset of phenophases. The temperatures of the third decade of March and the first-third decade of April have the most significant impact on the phenology of the studied species. The results confirm the high indicator role of phenological observations in assessing climate change and can be used to adapt urban landscaping strategies.

Key words: *phenology, bioindication, climate change, spring temperatures, Betula pendula, Tilia cordata, urban environment, Voronezh*

Funding: The study was conducted within the framework of the university internal grant No. 15V/25.

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

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

For citation: Serebryakov O. V., Yakovenko N. V. (2026). The influence of decade temperatures of the spring season on the phenological shifts of *Betula pendula* Roth. and *Tilia cordata* Mill. in the conditions of urban ecosystem (using the example of Voronezh city). Forestry Engineering journal. Vol. 16, No. 1 (61), pp. 98-112 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/7>.

Received 23.11.2025. **Revised** 23.12.2026. **Accepted** 15.03. 2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Современная эпоха характеризуется беспрецедентными по скорости и масштабу антропогенными изменениями климатической системы планеты. Согласно выводам Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2023), глобальная приземная температура уже повысилась на 1.1°C по сравнению с доиндустриальным уровнем, причем наиболее интенсивное потепление наблюдается в средних и высоких широтах Северного полушария, особенно в весенний период [1]. Это явление трансформирует фундаментальные биоклиматические ритмы, определяющие функционирование наземных экосистем. В условиях урбанизированных территорий глобальный тренд накладывается на мощный локальный эффект «городского теплового острова» (Urban Heat Island, UHI), который формирует специфический микроклимат с повышенным температурным фоном, измененным режимом влажности и атмосферной циркуляции [2, 3]. Таким образом, городские древесные насаждения оказываются

на «передовой» климатических изменений, испытывая кумулятивный стресс от глобальных и локальных факторов.

Фенология растений – наука о сезонных циклах развития – признана одним из наиболее чутких и интегральных биологических индикаторов реакции экосистем на изменение климата [4, 5]. Сдвиги в сроках наступления ключевых фенофаз, таких как распускание почек (фолофаза), начало цветения (антезис) или осеннее окрашивание листьев, являются непосредственным и измеримым откликом на динамику абиотических факторов среды. Многочисленные глобальные и региональные исследования последних лет однозначно свидетельствуют о тенденции к смещению весенних фенофаз на более ранние сроки, что напрямую коррелирует с потеплением весенних месяцев [6, 7]. Этот процесс нарушает сложившиеся эволюционно-стабильные синхронизации внутри экосистем (например, между цветением растений и активностью насекомых-опылителей), что может приводить к явлению «фенологического несоответствия»

(phenological mismatch) и снижению устойчивости биоценозов [8].

В контексте устойчивого развития городов и адаптации к изменению климата особую актуальность приобретает изучение фенологического отклика древесных пород-интродуцентов, составляющих основу зеленого каркаса. Такие виды, как береза повислая (*Betula pendula* Roth.) и липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), широко используются в озеленении городов Европейской части России благодаря своей декоративности, относительной устойчивости к техногенному загрязнению и рекреационной нагрузке [9-11]. Однако их долговечность, стабильность и эстетические качества в условиях меняющегося климата напрямую зависят от способности адаптировать свои фенологические ритмы к новым температурным реалиям [12-15]. Раннее распускание листьев повышает риск повреждения нежных тканей возвратными заморозками, а сдвиг сроков цветения может влиять на репродуктивный успех и жизненный цикл связанных с ними организмов [16].

Несмотря на значительный объем работ, посвященных влиянию климата на фенологию в естественных биотопах, существует ряд нерешенных вопросов применительно к урбанизированным территориям. Во-первых, большинство исследований оперирует среднемесячными температурами, тогда как критические для запуска фенофаз пороги суммы эффективных температур могут накапливаться в течение конкретных, часто коротких, периодов потепления внутри месяца [17]. Декадный (10-дневный) анализ температурного режима позволяет выявить эти «критические окна» влияния с большей точностью. Во-вторых, требуется больше данных о видоспецифичности фенологического отклика в условиях одного и того же урбополиса, где разные виды могут демонстрировать различную стратегию адаптации к идентичным климатическим сигналам [18-20]. В-третьих, остается открытым вопрос о том, насколько сильно антропогенный пресс (загрязнение воздуха, уплотнение почв) модулирует температурную реакцию фенологии, потенциально ослабляя или усиливая климатический сигнал [20-22].

Таким образом, проведение детальных региональных исследований, сочетающих

многолетний фенологический мониторинг с высокоразрешенным (декадным) анализом метеоданных в условиях конкретного города, является необходимым шагом для разработки научно обоснованных адаптационных мер в области городского лесоустройства и озеленения.

Целью данного исследования является количественная оценка влияния температурного режима весеннего сезона (март–май) на динамику наступления ключевых фенофаз у модельных древесных пород (*Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.) в условиях разноуровневой антропогенной нагрузки в г. Воронеже.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проанализировать многолетнюю (2021–2024 гг.) динамику среднемесячных и декадных температур воздуха весенних месяцев на территории г. Воронежа.
2. На основе оригинальных полевых данных зафиксировать межгодовую и пространственную изменчивость сроков наступления фенофаз распускания листьев и начала цветения у березы повислой и липы мелколистной на восьми модельных площадках, различающихся по характеру антропогенного воздействия.
3. Методом корреляционного анализа (Пирсона) установить силу, направленность и статистическую значимость связей между различными температурными параметрами (среднесезонные, среднемесячные, декадные значения) и датами наступления исследуемых фенологических событий для каждой древесной породы.
4. На основе выявленных корреляционных закономерностей оценить сравнительную индикаторную значимость *Betula pendula* и *Tilia cordata* для биоиндикации весеннего потепления и сформулировать практические рекомендации для мониторинга состояния городских насаждений в условиях изменяющегося климата.

Научная новизна работы заключается в применении подхода декадного анализа температур для выявления наиболее значимых периодов влияния на фенологию в условиях урбоэкосистемы, а также в сравнительной оценке видоспецифичного фенологического

отклика двух доминирующих в озеленении пород на трансекте с градиентом антропогенной нагрузки.

Материалы и методы

1. Объекты и район исследований

Исследования проводились в период 2021–2024 гг. на территории городского округа город Воронеж, расположенного в лесостепной зоне Среднерусской возвышенности. В качестве модельных объектов были выбраны две широко распространенные в озеленении города листопадные древесные породы:

- Береза повислая (*Betula pendula* Roth.) – пионерная порода, характеризующаяся высокой экологической пластичностью и ранним началом вегетации.
- Липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) – устойчивая, долговечная порода, являющаяся доминантом в составе многих парковых и аллеиных насаждений, с более поздними сроками вегетативного и генеративного развития.

Для учета пространственной неоднородности городской среды и градиента антропогенной нагрузки наблюдения проводились на 8 постоянных фенологических площадках (ФП), заложенных в различных функциональных зонах города (Таблица 1, рис.1).

Выбор площадок обеспечил репрезентативность данных и позволил усреднить локальные микроклиматические эффекты для выявления общегородского тренда.

2. Методика фенологических наблюдений

На каждой фенологической площадке было выбрано и промаркировано по 10 модельных деревьев каждой породы. Критериями отбора служили: возрастная группа (взрослые, генеративные особи), хорошее витальное состояние (отсутствие видимых повреждений, усыхания), достаточная инсоляция (деревья опушечные или первого яруса).

Наблюдения проводились с периодичностью 1 раз в 2 дня в ключевые периоды ожидания фенофаз (с конца марта по июнь). Фиксировались две основные фенофазы, наиболее четко определяемые

визуально и значимые для оценки начала вегетации:

1. Начало распускания листьев (ВВСН 11): дата, когда у 50% и более модельных деревьев на побегах стандартного уровня (1.5-2 м) развернулись первые листовые пластинки, вышедшие из почечных чешуй.
2. Начало цветения (ВВСН 61): дата, когда у 50% и более модельных деревьев раскрылись первые цветки (сережки у *Betula pendula*; соцветия-полусонтики у *Tilia cordata*).

Дата наступления фенофазы для каждой площадки определялась как средняя арифметическая от дат, зафиксированных для 10 модельных деревьев. Для последующего общегородского анализа использовалась усредненная дата по всем 8 площадкам, что минимизировало влияние локальных условий конкретной ФП.

3. Источники и обработка климатических данных

Ежедневные данные о температуре воздуха были получены по метеостанции «Воронеж» (идентификатор 34123) за период с 1 марта по 31 мая 2021–2024 гг. Выбор данной станции обусловлен надежностью, непрерывностью ряда наблюдений и репрезентативностью данных для фона городской территории.

Для статистической оценки термического режима весеннего сезона на основе ежедневных данных были рассчитаны агрегированные температурные показатели трёх уровней. На первом уровне определялись среднемесячные значения температуры воздуха для каждого весеннего месяца — марта, апреля и мая. На втором уровне вычислялся интегральный показатель — средняя температура весеннего сезона, представляющая собой среднее арифметическое значений за три указанных месяца. Для более детального анализа внутримесячной динамики использовался третий уровень — расчёт среднедекадных температур. При этом каждая декада определялась как стандартный 10-дневный интервал: первая (1–10 число), вторая (11–20 число) и третья (21–30/31 число).

Characteristics of Phenological Observation Sites*

№ ФП / Site No.	Название и расположение / Name and Location	Краткая характеристика / Brief Characteristics (тип насаждения, преобладающая нагрузка / plantation type, predominant load)	Условный уровень антропогенной нагрузки* / Conventional Level of Anthropogenic Load*
1	Парк «Алые паруса» (левый берег) / "Alie Parusa" Park (left bank)	Прибрежный парк, аллеи из модельных пород, высокая рекреация. / Riverside park, alleys of model species, high recreational load	Средний / Medium
2	Дендропарк им. Глинки (правый берег) / Glynky Dendrological Park (right bank)	Дендрологический парк в пределах нагорной дубравы, окружен автодорогами. / Dendrological park within the upland oak forest, surrounded by roads	Средний / Medium
3	Центральный парк / Central Park	Крупный лесопарк со сложным рельефом, максимальная рекреационная нагрузка. / Large forest park with complex topography, maximum recreational load	Высокий / High
4	Студенческий городок ВГЛУ (Дендрарий) / VGLTU Campus (Arboretum)	Аллеи в дендрарии учебного заведения, непосредственная близость к магистрали. / Alleys in the university arboretum, immediate proximity to a highway	Очень высокий / Very High
5	Лесопарк «Оптимистов» / "Optimistov" Forest Park	Крупный лесной массив на междуречье, умеренная рекреация. / Large forest tract on an interfluve, moderate recreation	Низкий / Low
6	Ботанический сад ВГУ (ООПТ) / VSU Botanical Garden (Specially Protected Natural Area)	Охраняемая территория (памятник природы), закрытый режим посещения. / Protected area (natural monument), restricted access	Низкий / Low
7	Парк «Олимпик» (в составе заказника) / "Olimpik" Park (within a wildlife preserve)	Пригородный парк в границах ООПТ «Воронежская нагорная дубрава». / Suburban park within the boundaries of the "Voronezh Upland Oak Forest" preserve	Низкий / Low
8	Кольцовский сквер (исторический центр) / Koltsovsky Square (historic center)	Компактный сквер в деловом центре, окруженный плотной застройкой и дорогами. / Compact square in the business center, surrounded by dense development and roads	Очень высокий / Very High
*Уровень нагрузки оценен интегрально по критериям: загазованность, шум, рекреационная динамика, степень преобразования почвенного покрова. / *The load level was assessed integrally based on criteria: air pollution, noise, recreational dynamics, degree of soil cover transformation			

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

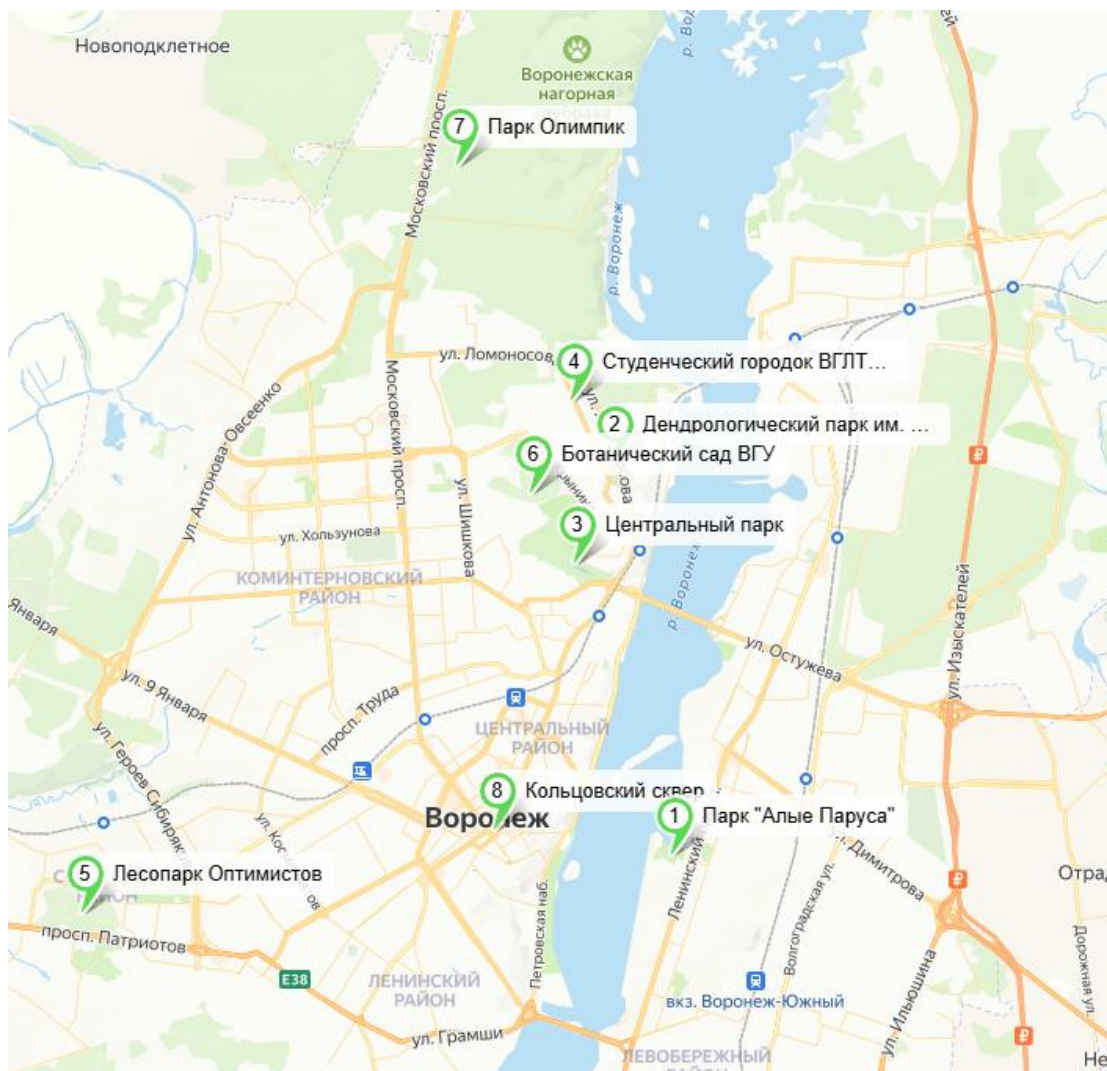


Рис. 1. Расположение фенологических площадок на территории г. Воронежа

Fig. 1. The location of phenological sites on the territory of Voronezh

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

4. Статистический анализ

В целях установления количественных зависимостей между параметрами температурного режима и сроками наступления фенологических фаз был применен корреляционный анализ посредством расчета коэффициента линейной корреляции Пирсона (r). Анализ проводился отдельно для каждой исследуемой древесной породы и каждой фенофазы. В качестве сопоставляемых переменных использовались преобразованные в числовой непрерывный формат усредненные

календарные даты наступления фенофаз (например, порядковый номер дня в году) и совокупность рассчитанных температурных показателей (среднесезонные, среднемесячные, среднедекадные значения) за соответствующий год наблюдений. Интерпретация силы выявленных корреляционных связей осуществлялась на основе общепринятой градации: значения $|r| < 0.3$ рассматривались как слабая связь, $0.3 \leq |r| < 0.7$ – как умеренная, а $|r| \geq 0.7$ – как сильная. Отрицательный знак коэффициента свидетельствовал об обратной

зависимости, то есть о смещении даты наступления фенофазы на более ранний срок при повышении температуры. Для наглядного представления результатов была построена матричная тепловая карта (heatmap), где цветовая интенсивность ячейки соответствовала величине коэффициента корреляции. Все статистические вычисления и графические построения выполнены с использованием программного пакета PAST 4.03 и Microsoft Excel 365.

Результаты

Полученные данные демонстрируют комплексное взаимодействие между климатическим фактором и биологическим ответом экосистемы. Установленные температурные тренды весеннего сезона служат основой для интерпретации наблюдаемых фенологических сдвигов. Последующий корреляционный анализ позволил перейти от констатации фенологических изменений к количественной оценке силы и специфики влияния различных временных срезов термического режима. Интеграция этих трех аспектов — климатического, фенологического и статистического — формирует целостную картину реакции городских древесных насаждений на современные изменения погодно-климатических условий.

3.1. Динамика температурного режима весеннего сезона (2021–2024 гг.) Анализ данных метеостанции за четырехлетний период выявил неоднородную динамику температур весенних месяцев в г. Воронеже (табл. 1). Наблюдался общий тренд к потеплению среднесезонной температуры весны: с $+6.2^{\circ}\text{C}$ в 2022 г. до $+9.8^{\circ}\text{C}$ в 2024 г. Март характеризовался наибольшей межгодовой изменчивостью: среднемесячная температура

варьировала от -2.7°C (2022 г.) до $+2.7^{\circ}\text{C}$ (2023 г.). Ключевой особенностью стала аномально теплая третья декада марта, средняя температура которой устойчиво повышалась, достигнув в 2024 г. значения $+6.2^{\circ}\text{C}$. Для апреля был зафиксирован наиболее выраженный тренд потепления, особенно во второй и третьей декадах, где в 2024 г. температуры превысили $+15^{\circ}\text{C}$. Температурный режим мая отличался большей стабильностью, однако во вторую декаду мая отмечалось устойчивое похолодание, что увеличивало климатические риски для вегетирующих растений.

3.2. За период наблюдений у обеих исследуемых пород зафиксирована устойчивая тенденция к смещению сроков наступления весенних фенофаз на более ранние даты. Реакция видов имела выраженную специфичность.

У березы повислой (*Betula pendula* Roth.) начало распускания листьев сместилось в среднем на 13 дней: с 22 апреля в 2021 г. до 9 апреля в 2024 г. Начало цветения демонстрировало еще более значительный сдвиг – в среднем на 14 дней, с 23 апреля (2021 г.) на 9 апреля (2024 г.). Смещение фаз было синхронным на всех площадках, что указывает на доминирующую роль регионального климатического фактора над локальными условиями.

У липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) динамика была менее линейной, но общий тренд к ускорению также проявился. Распускание листьев сместилось на 17 дней – с первой декады мая в 2021 г. на вторую декаду апреля в 2024 г. Сроки начала цветения показали зависимость от температурного фона сезона: в холодном 2022 г. фаза наступила 24 июня, тогда как в аномально теплом 2024 г. – 13 июня, что составило смещение на 7 дней относительно 2021 г. (18 июня).

Динамика температурных показателей весеннего сезона (г. Воронеж, 2021–2024 гг.)

Table 1

Dynamics of spring season temperature indicators (Voronezh, 2021–2024)

Показатель / Год / Indicator / Year	2021	2022	2023	2024
Среднее за сезон, °C / Season average, °C	+8.2	+6.2	+9.4	+9.8
Март, °C / March, °C	-0.5	-2.7	+2.7	+1.2
1 декада / 1st decade	-1.7	-2.7	+0.5	-2.7
2 декада / 2nd decade	-2.5	-6.2	+2.4	-0.4
3 декада / 3rd decade	+2.6	+3.1	+7.7	+6.2
Апрель, °C / April, °C	+8.9	+10.2	+9.8	+14.6
1 декада / 1st decade	+6.6	+7.7	+9.2	+13.9
2 декада / 2nd decade	+11.6	+11.6	+9.01	+15.1
3 декада / 3rd decade	+8.6	+11.1	+11.4	+14.7
Май, °C / May, °C	+16.2	+11.8	+14.8	+14.0
1 декада / 1st decade	+12.9	+10.1	+10.2	+10.9
2 декада / 2nd decade	+17.5	+12.3	+16.1	+11.2
3 декада / 3rd decade	+17.9	+13.0	+17.7	+19.3

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Выявленные температурные тренды напрямую определили фенологическую реакцию исследуемых древесных пород.

Для количественной оценки силы влияния выявленных температурных трендов на зафиксированные фенологические сдвиги был проведен корреляционный анализ.

3.3. Корреляционный анализ связи температурных параметров и сроков наступления фенофаз.

Результаты корреляционного анализа выявили статистически значимые связи между температурным режимом и фенологическими датами. Для всех исследуемых фенофаз коэффициенты корреляции с температурными показателями имели отрицательный знак, подтверждая гипотезу о более раннем наступлении фаз при повышении температуры.

1. Связь со среднесезонной температурой весны

Наиболее сильная отрицательная корреляция установлена для начала цветения: $r = -0.77$ у березы и $r = -0.83$ у липы. Связь сроков распускания листьев с сезонной температурой была умеренной ($r = -0.63$ и $r = -0.70$ соответственно).

2. Помесячный и декадный анализ.

Анализ выявил, что ключевым месяцем, определяющим фенологический «график» обоих видов, является апрель. Корреляция с его среднемесячной температурой достигала значений от -0.79 до -0.97. Детализация по декадам показала, что:

- Для *березы повислой* критически важны температуры третьей декады марта (r до -0.84) и первой и третьей декад апреля (r от -0.91 до -0.95).
- Для *липы мелколистной* решающее влияние оказывают температуры первой декады апреля на распускание листьев ($r = -0.99$) и третьей декады мая на начало цветения ($r = -0.87$) (табл.2, рис.2).

3. Интерпретация по шкале силы связи.

В соответствии с принятой градацией, выявлены преимущественно сильные ($|r| \geq 0.7$) корреляции для фаз цветения и распускания листьев березы, а также распускания листьев липы с температурой апреля. Умеренные связи ($0.3 \leq |r| < 0.7$) характерны для зависимости фенофаз от температуры марта в целом.

Таблица 2

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона (фрагмент ключевых связей)

Table 2

Pearson correlation coefficient matrix (fragment of key relationships)

Фенофаза / Температурный показатель / Phenophase / Temperature indicator	Весна (сред.) / Spring (avg.)	Март (3 дек.) / March (3rd dec.)	Апрель (1 дек.) / April (1st dec.)	Апрель (сред.) / April (avg.)	Май (3 дек.) / May (3rd dec.)
Береза: Начало цветения / Birch: Flowering onset	-0.77	-0.84	-0.95	-0.84	-0.58
Береза: Распускание листьев / Birch: Leaf unfolding	-0.63	-0.84	-0.92	-0.82	-0.39
Липа: Начало цветения / Lime: Flowering onset	-0.83	-0.44	-0.83	-0.79	-0.87
Липа: Распускание листьев / Lime: Leaf unfolding	-0.70	-0.59	-0.99	-0.97	-0.61

Примечание: Полужирным выделены сильные корреляционные связи ($|r| \geq 0.7$) / Note: Strong correlation relationships ($|r| \geq 0.7$) are highlighted in bold.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

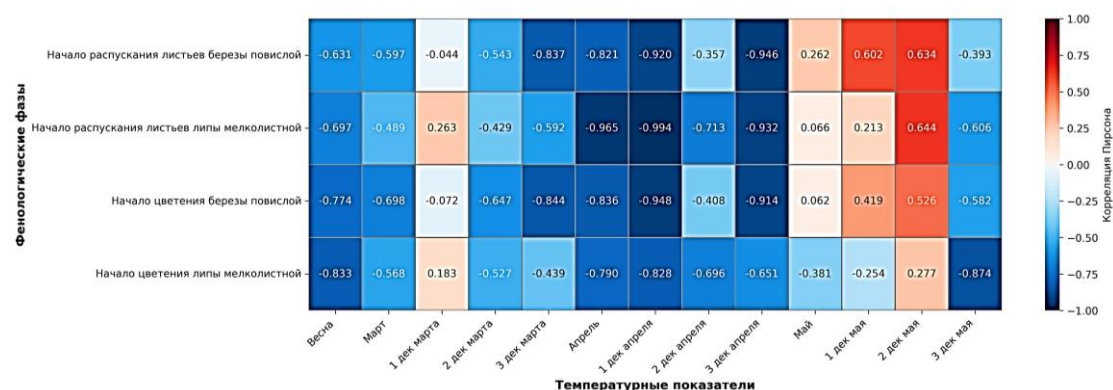


Рис .2. Тепловая карта корреляций между температурными параметрами весеннего сезона и сроками наступления фенофаз у *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.

Fig. 2. Heat map of correlations between the temperature parameters of the spring season and the timing of the onset of phenophases in *Betula pendula* Roth. and *Tilia cordata* Mill.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таким образом, результаты подтвердили, что динамика температур весеннего сезона, особенно в критические внутрисезонные периоды, является основным драйвером смещения фенологических ритмов у изучаемых древесных пород в условиях урбоэкосистемы.

Выявленная видоспецифичность отклика указывает на различную фенологическую пластичность березы повислой и липы мелколистной.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. На протяжении 2021–2024 гг. на территории г. Воронежа зафиксирован устойчивый тренд к потеплению весеннего сезона, характеризующийся значительной внутрисезонной неоднородностью. Ключевыми особенностями являются выраженное потепление третьей декады марта, аномально высокие температуры апреля и тенденция к похолоданию во второй декаде мая, что создает специфический и потенциально стрессовый режим для начала вегетации растений.
2. У исследуемых видов (*Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill.) выявлена устойчивая тенденция к смещению сроков наступления весенних фенофаз (распускание листьев и начало цветения) на более ранние даты. Береза повислая проявила большую чувствительность, продемонстрировав сдвиг фаз на 13–14 дней, в то время как реакция липы мелколистной (сдвиг на 7–17 дней) в большей степени модулировалась общим температурным фоном сезона. Синхронность сдвигов на площадках с разным уровнем антропогенной нагрузки подтверждает доминирующую роль регионального климатического сигнала над локальными условиями в регулировании сроков наступления изученных фенофаз.
3. Корреляционный анализ статистически подтвердил сильную обратную связь между температурными показателями и датами наступления фенофаз. Установлена критическая значимость конкретных внутрисезонных периодов: для березы повислой решающими являются температуры третьей декады марта и первой–третьей декад апреля ($|r| = 0.82–0.95$), а для липы мелколистной — первой декады апреля для распускания листьев ($|r|$

$= -0.99$) и третьей декады мая для начала цветения ($|r| = -0.87$). Это свидетельствует о различной стратегии фенологического ответа на теплообеспеченность: береза реагирует на раннее весеннее тепло, активируя вегетацию, тогда как липа, будучи более поздней породой, интегрирует температурную информацию на протяжении всей весны для инициации цветения.

Научно-практическая значимость

Результаты работы обосновывают использование фенологического мониторинга березы повислой и липы мелколистной в качестве эффективного инструмента биоиндикации весеннего потепления в условиях урбоэкосистем. Выявленная видоспецифичность реакций должна учитываться при разработке адаптационных стратегий городского озеленения:

- Для прогноза и мониторинга: Наблюдения за фенофазой «распускание листьев» у березы могут служить ранним индикатором наступления фенологической весны и оценки рисков повреждения поздневесенними заморозками.
- Для подбора ассортимента: При проектировании устойчивых зеленых насаждений в условиях меняющегося климата необходимо учитывать различную фенологическую пластичность пород. Высокая чувствительность березы делает ее уязвимой к резким температурным колебаниям, в то время как липа, с ее более «консервативной» и протяженной реакцией на тепло, может проявлять большую устойчивость.
- Для лесовосстановления: Полученные данные о температурных порогах и критических периодах могут быть использованы для моделирования фенологических событий и оценки потенциальных изменений в сезонном развитии лесных экосистем региона.

Таким образом, работа вносит вклад в понимание механизмов фенологического отклика древесных растений на изменение термического режима в специфических условиях городской среды. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение отдаленных последствий фенологических сдвигов (влияние на

репродуктивный успех, устойчивость к патогенам) и на интеграцию фенологических моделей с прогнозами климатических сценариев для территории Центрального Черноземья.

Заключение

Результаты настоящего исследования выявили статистически значимые и видоспецифические закономерности реакции фенологических ритмов древесных пород на динамику весенних температур в условиях урбоэкосистемы. Установлено, что смещение сроков наступления фенофаз у *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. носит нелинейный характер и определяется не общим трендом потепления, а изменением термического режима в строго определенные внутрисезонные периоды (декады). Верифицирована гипотеза о ведущей роли температур апреля как ключевого регулятора фенологического «графика» для обеих пород, при этом для березы повислой критически значимым является также прогрев в третьей декаде марта, а для липы мелколистной — термические условия третьей декады мая.

Апробированный методологический подход, сочетающий высокоразрешенный (декадный) климатический анализ с полевым фенологическим мониторингом на трансекте антропогенной нагрузки, доказал свою эффективность для количественной оценки и прогнозирования биологических откликов на климатические изменения в гетерогенной городской среде. Выявленные сильные корреляционные зависимости ($|r| \geq 0.7$) между конкретными температурными параметрами и датами наступления фенофаз позволяют

рассматривать фенологию модельных пород в качестве оперативного диагностического инструмента для системы мониторинга состояния городских насаждений и оценки климатических рисков.

С практической точки зрения, полученные данные формируют основу для разработки адаптационных мер в сфере городского озеленения и лесовосстановления. Учет различной фенологической пластичности пород, подтвержденный результатами работы, необходим для научно обоснованного подбора ассортимента, создания устойчивых дендрокомпозиций и минимизации ущерба от поздневесенних заморозков. В частности, высокая чувствительность березы повислой к ранневесеннему потеплению делает ее удобным индикаторным видом, но требует осторожности при использовании в зонах с высоким риском возвратных холодов.

В перспективе целесообразно расширение временного ряда наблюдений для усиления репрезентативности моделей, а также интеграция полученных региональных зависимостей в общегосударственные базы фенологических данных и климатические сценарии. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение сопряженности выявленных фенологических сдвигов с физиологическим статусом растений, их продуктивностью и устойчивостью к биотическим стрессам в условиях продолжающихся климатических изменений.

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2023. – URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
2. Menzel A., Yuan Y., Matiu M., Sparks T., Scheifinger H., Gehrig R., Estrella N. Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*. 2020; 26 (4): 2599-2612. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>.
3. Zhao L., Dai J., Tang Q., Zhang H. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982–2016). *Scientific Reports*. 2021; 11: 17746. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97331-2>.
4. Vitasse Y., Baumgarten F., Zohner C.M., Fu Y.H., Walde J., Frei E.R., Wohlgemuth T. The great acceleration of plant phenological shifts. *Nature Climate Change*. 2022; 12: 300–304. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01283-y>.

5. Piao S., Liu Q., Chen A., Janssens I.A., Fu Y., Dai J., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*. 2022; 28 (6): 1922-1940. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16057>.
6. Richardson A.D., Hufkens K., Milliman T. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 331: 109315. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109315>.
7. Guesmi B. Climate as the Major Factor Controlling Phenology. *Agrometeorology*. IntechOpen, 2021. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95893>.
8. Meng L., Mao J., Zhou Y., Richardson A.D., Lee X., Thornton P.E., Ricciuto D.M., Li X. Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (8): 4228-4233. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1911171117>.
9. Meng L., Zhou Y., Li X., Asrar G.R., Mao J., Wanamaker A.D., Wang Y. Divergent responses of spring phenology to daytime and nighttime warming. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020; 281: 107832. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107832>.
10. Чичагов В.П., Полякова А.В. Реакция фенологии древесных растений на изменение климата в условиях средней полосы России. *Лесоведение*. – 2021. – № 5. – С. 502–515.
11. Серебряков О.В., Яковенко Н.В. Влияние современных климатических тенденций на фенологию древесных пород: последствия для устойчивого лесовосстановления в Центральном Черноземье. *Научно-агрономический журнал*. – 2025. – № 4 (131). – С. 5-17. – DOI: <https://doi.org/10.34736/FNC.2025.131.4.001>.
12. Емельянова О.Ю., Цой М.Ф., Масалова Л.И. Фенологические наблюдения как основа формирования базы данных феноспектров древесных растений. *Овощи России*. – 2020. – № 6. – С. 77-84. – DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-6-77-84>.
13. Li Y., Qin Y., Ma L., Pan Z. Climate change: vegetation and phenological phase dynamics. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2020; 12 (4): 495–509. – DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2019-0037>.
14. Yu H., Mo Z., Tan T., Li X., Wang Y., Zhang Y., Wu C. Earlier spring onset and autumn warming increase the discrepancy between leaf coloration and photosynthetic cessation. *Communications Earth & Environment*. 2026; 7: 12. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03239-y>.
15. Liu Q., Fu Y.H., Zhu Z., Liu Y., Liu Z., Huang M., Janssens I.A., Piao S. Species-specific responses of spring phenology to climate change in a temperate forest. *Ecological Indicators*. 2020; 117: 106704. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106704>.
16. Van der Meersch V., Wolkovich E.M. Summer solstice optimizes the thermal growing season. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2025; 122 (23): e2506796122. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2506796122>.
17. Meyer B.F., Buras A., Gregor K., Layritz L.S., Principe A., Kreyling J., Rammig A., Zang C.S. Frost matters: incorporating late-spring frost into a dynamic vegetation model regulates regional productivity dynamics in European beech forests. *Biogeosciences*. 2024; 21: 1355–1370. – DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-1355-2024>.
18. Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Сезонная изменчивость листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения окружающей среды (Уфимский промышленный центр, Республика Башкортостан). *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2025. – Т. 29. – № 3. – С. 65–91. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-3-65-91>.
19. Жуйкова Т.В., Мелинг Э.В., Попова А.С. Групповая изменчивость морфологических признаков листа *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) в градиентах погодных условий и техногенной трансформации почв. *Поволжский экологический журнал*. – 2023. – № 1. – С. 37–57. – DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-37-57>.
20. Минин А.А., Буйволов Ю.А., Самохина О.Ф., Бардин М.Ю., Демидов В.Э., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Рыжков О.В., Сапельникова И.И., Фомин Б.Н., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. Фенологические тренды в природе России: насколько они следуют за

изменениями климата? Фундаментальная и прикладная климатология. – 2024. – Т. 10. – № 3. – С. 378-398. – DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-3-378-398>.

21. Delgado M., Roslin T., Tikhonov G., Ovaskainen O., Soininen J., Vierola A., Ilmonen J., Paasivirta L., Roininen H., Ayres M., Bässler C., Forshage M., Fritze M., Halme P., Heikkala O., Hunter M., Kähkönen K., Kakko M., Komonen A., Koricheva J., Kouki J., Lanta V., Liira J., Lundell J., M. Müller J., Nyman T., Pöyry J., Schmidt N.M., Stone D., Tiisanen M., Várkonyi G., Villforth L., Vrezec A., Yakovlev R., Zverev V. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (49): 31249–31258. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2002713117>.
22. Минин А.А., Ананин А.А., Буйолов Ю.А., Ларин Е.Г., Лебедев П.А., Поликарпова Н.В., Прокошева И.В., Руденко М.И., Сапельникова И.И., Федотова В.Г., Шуйская Е.А., Яковлева М.В., Янцер О.В. Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России. *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. – 2020. – Т. 5. – № 4. – С. 89-110. – DOI: <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.060>.

References

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2023. – URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
2. Menzel A., Yuan Y., Matiu M., Sparks T., Scheifinger H., Gehrig R., Estrella N. Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*. 2020; 26 (4): 2599-2612. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>.
3. Zhao L., Dai J., Tang Q., Zhang H. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982–2016). *Scientific Reports*. 2021; 11: 17746. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97331-2>.
4. Vitasse Y., Baumgarten F., Zohner C.M., Fu Y.H., Walde J., Frei E.R., Wohlgemuth T. The great acceleration of plant phenological shifts. *Nature Climate Change*. 2022; 12: 300–304. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01283-y>.
5. Piao S., Liu Q., Chen A., Janssens I.A., Fu Y., Dai J., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*. 2022; 28 (6): 1922-1940. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16057>.
6. Richardson A.D., Hufkens K., Milliman T. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2023; 331: 109315. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109315>.
7. Guesmi B. Climate as the Major Factor Controlling Phenology. *Agrometeorology*. IntechOpen, 2021. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95893>.
8. Meng L., Mao J., Zhou Y., Richardson A.D., Lee X., Thornton P.E., Ricciuto D.M., Li X. Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (8): 4228-4233. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1911117117>.
9. Meng L., Zhou Y., Li X., Asrar G.R., Mao J., Wanamaker A.D., Wang Y. Divergent responses of spring phenology to daytime and nighttime warming. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020; 281: 107832. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107832>.
10. Chichagov V. P., Polyakova A. V. Reaktsiya fenologii drevesnykh rasteniy na izmenenie klimata v usloviyakh sredney polosy Rossii. [Response of tree plant phenology to climate change in Central Russia]. *Lesovedenie*, 2021; 5: 502–515.
11. Serebryakov O. V., Yakovenko N. V. Vliyanie sovremennykh klimaticheskikh tendentsiy na fenologiyu drevesnykh porod: posledstviya dlya ustoychivogo lesovosstanovleniya v Tsentral'nom Chernozem'e. [Influence of modern climatic trends on tree species phenology: consequences for sustainable reforestation in the Central Chernozem Region]. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2025; 4 (131): 5-17. – DOI: <https://doi.org/10.34736/FNC.2025.131.4.001>.
12. Emel'yanova O. Yu., Tsoy M. F., Masalova L. I. Fenologicheskie nablyudeniya kak osnova formirovaniya bazy dannykh fenospektrov drevesnykh rasteniy. [Phenological observations as a basis for the formation

- of a database of phenospectra of woody plants]. *Ovoshchi Rossii*, 2020; 6: 77-84. – DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-6-77-84>.
13. Li Y., Qin Y., Ma L., Pan Z. Climate change: vegetation and phenological phase dynamics. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2020; 12 (4): 495–509. – DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-06-2019-0037>.
 14. Yu H., Mo Z., Tan T., Li X., Wang Y., Zhang Y., Wu C. Earlier spring onset and autumn warming increase the discrepancy between leaf coloration and photosynthetic cessation. *Communications Earth & Environment*. 2026; 7: 12. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03239-y>.
 15. Liu Q., Fu Y.H., Zhu Z., Liu Y., Liu Z., Huang M., Janssens I.A., Piao S. Species-specific responses of spring phenology to climate change in a temperate forest. *Ecological Indicators*. 2020; 117: 106704. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106704>.
 16. Van der Meersch V., Wolkovich E.M. Summer solstice optimizes the thermal growing season. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2025; 122 (23): e2506796122. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2506796122>.
 17. Meyer B.F., Buras A., Gregor K., Layritz L.S., Principe A., Kreyling J., Rammig A., Zang C.S. Frost matters: incorporating late-spring frost into a dynamic vegetation model regulates regional productivity dynamics in European beech forests. *Biogeosciences*. 2024; 21: 1355–1370. – DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-21-1355-2024>.
 18. Tagirova O. V., Kulagin A. Yu. Sezonnaya izmenchivost' list'ev berezy povisloy (*Betula pendula* Roth) v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy (Ufimskiy promyshlennyy tsentr, Respublika Bashkortostan). [Seasonal variability of silver birch (*Betula pendula* Roth) leaves under industrial environmental pollution (Ufa industrial center, Republic of Bashkortostan)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025; 29 (3): 65–91. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2025-3-65-91>.
 19. Zhuykova T. V., Meling E. V., Popova A. S. Gruppovaya izmenchivost' morfologicheskikh priznakov lista *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) v gradientakh pogodnykh usloviy i tekhnogennoy transformatsii pochv. [Group variability of morphological characteristics of *Betula pendula* Roth (Betulaceae, Magnoliópsida) leaf in gradients of weather conditions and technogenic soil transformation]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2023; 1: 37–57. – DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-1-37-57>.
 20. Minin A. A., Buyvolov Yu. A., Samokhina O. F., Bardin M. Yu., Demidov V. E., Lebedev P. A., Polikarpova N. V., Prokosheva I. V., Ryzhkov O. V., Sapel'nikova I. I., Fomin B. N., Shuyskaya E. A., Yakovleva M. V., Yantser O. V. Fenologicheskie trendy v prirode Rossii: naskol'ko oni sleduyut za izmeneniyami klimata? [Phenological trends in Russian nature: how closely do they follow climate changes?]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2024; 10 (3): 378-398. – DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-3-378-398>.
 21. Delgado M., Roslin T., Tikhonov G., Ovaskainen O., Soininen J., Vierola A., Ilmonen J., Paasivirta L., Roininen H., Ayres M., Bässler C., Forshage M., Fritze M., Halme P., Heikkala O., Hunter M., Kähkönen K., Kakko M., Komonen A., Koricheva J., Kouki J., Lanta V., Liira J., Lundell J., M. Müller J., Nyman T., Pöyry J., Schmidt N.M., Stone D., Tiusanen M., Várkonyi G., Villforth L., Vrezec A., Yakovlev R., Zverev V. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020; 117 (49): 31249–31258. – DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2002713117>.
 22. Minin A. A., Ananin A. A., Buyvolov Yu. A., Larin E. G., Lebedev P. A., Polikarpova N. V., Prokosheva I. V., Rudenko M. I., Sapel'nikova I. I., Fedotova V. G., Shuyskaya E. A., Yakovleva M. V., Yantser O. V. Rekomendatsii po unifikatsii fenologicheskikh nablyudeniy v Rossii. [Recommendations for the unification of phenological observations in Russia]. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*, 2020; 5 (4): 89-110. – DOI: <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.060>.

Информация об авторах

Серебряков Олег Владимирович – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0009-0006-1171-0368, e-mail: o-ser00@mail.ru.

✉ *Яковенко Наталия Владимировна* – доктор географических наук, главный научный сотрудник дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.

Information about the authors

Oleg V. Serebryakov – Postgraduate Student of the Department of Ecology, Forest Protection and Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0009-0006-1171-0368, e-mail: o-ser00@mail.ru.

✉ *Nataliya V. Yakovenko* – Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher at the Directorate of the Research Institute of Innovative Technologies and the Forestry Complex, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4203-0040, e-mail: n.v.yakovenko71@gmail.com.



Для контактов | Corresponding author



Моделирование таксационных характеристик насаждений сухопутной территории Арктики с использованием аллометрических уравнений и данных дистанционного зондирования

Зинаида А. Харитонов ✉, zvekshina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>
Сергей В. Коптев, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация

Исследование направлено на разработку комплексного подхода к оценке таксационных характеристик (запас, средние диаметр и высота) притундровых насаждений сухопутной территории Арктики. Методология основана на интеграции данных государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) за 2021 год с материалами аэрофотосъёмки высокого разрешения 2022 года. В работе адаптированы классические аллометрические модели Уоды, Рейнеке и Хильми для условий притундровых лесов и редкостойной тайги для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) V класса бонитета. Показатель степени в уравнениях зафиксирован на теоретическом уровне – 0.5, что позволило вычислить региональные константы моделей. Для определения ключевого параметра моделей – густоты древостоя выполнено дешифрирование аэрофотоснимков с использованием стереоскопического анализа в среде PHOTOMOD. Получены адаптированные параметры уравнений: для запаса древостоев ($c_1=3279.63$, $R^2=0.816$), среднего диаметра ($c_3=404.76$, $R^2=0.703$) и средней высоты ($c_2=298.47$, $R^2=0.550$). Апробация модели Уоды на контрольных участках выявила систематическое расхождение с данными ГИЛ, что объясняется необходимостью точного учета полноты насаждений при переходе от данных дистанционного зондирования к таксационным показателям. Практическая значимость работы заключается в создании методической основы для дистанционной инвентаризации лесных ресурсов труднодоступных арктических территорий, позволяющей сократить объём дорогостоящих наземных работ.

Ключевые слова: моделирование, аллометрические модели, аэрофотосъёмка высокого разрешения, таксация леса, сухопутная зона Арктики, таксационные параметры

Финансирование: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы: 123022800118–4).

Благодарности: авторы благодарят Архангельский филиал ФГБУ «Рослесинфорг» за предоставленные материалы пробных площадей ГИЛ, рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Харитонов, З. А. Моделирование таксационных характеристик насаждений сухопутной территории Арктики с использованием аллометрических уравнений и данных дистанционного зондирования / З. А. Харитонов, С. В. Коптев // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 113–126. – Библиогр.: с. 122–125 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/8>.

Поступила 11.02.2025. Пересмотрена 11.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Modeling of the taxation characteristics of tree stands in the Arctic land area using allometric equations and remote sensing data

Zinaida A. Kharitonova ✉, zvekshina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>

Sergey V. Koptev, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

The research is aimed at developing an integrated approach to assessing the taxation characteristics (stock, average diameter and height) of tundra stands in the Arctic land area. The methodology is based on the integration of data from the State Forest Inventory (SFI) for 2021 with high-resolution aerial photography in 2022. The paper adapts the classical allometric models of Woda, Reinecke and Hilmi for the conditions of tundra forests and rare-coniferous taiga for Siberian spruce stands (*Picea obovata* L.) of the V class of bonity. The exponent in the equations is fixed at the theoretical level of -0.5, which made it possible to calculate the regional constants of the models. To determine the key parameter of the models, the density of the stand, aerial photographs were decoded using stereoscopic analysis in the PHOTOMOD program. Adapted parameters of the equations were obtained: for the stand stock ($C_1=3279.63$, $R^2=0.816$), the average diameter ($c_2=404.76$, $R^2=0.703$) and the average height ($c_3=298.47$, $R^2=0.550$). Testing of the Uoda model at control sites revealed a systematic discrepancy with the SFI data, which is explained by the need to accurately account for the relative density of stands when switching from remote sensing data to taxation parameters. The practical significance of the work lies in the creation of a methodological framework for remote inventory of forest resources in hard-to-reach Arctic territories, which makes it possible to reduce the amount of expensive ground work.

Keywords: modeling, allometric models, high-resolution aerial photography, forest taxation, Arctic land area, taxation parameters

Funding: The publication is based on the results of research carried out as part of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution "North Research Institute of Forestry" to conduct applied scientific research in the field of the Federal Forestry Agency (registration number of the topic: 123022800118-4).

Acknowledgments: The authors thank the Arkhangelsk branch of FGBU "Roslesinforg" for providing the Forest sample plots data State Forest Inventory (SFI), authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

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

For citation: Kharitonova Z. A., Koptev S. V. (2026). Modeling of the taxation characteristics of tree stands in the Arctic land area using allometric equations and remote sensing data. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 113–126 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/8>.

Received 11.02.2026.

Revised 15.02.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

Мониторинг лесных ресурсов сухопутной территории Арктики представляет собой сложную научно-практическую задачу, обусловленную труднодоступностью, низкой продуктивностью и уязвимостью притундровых экосистем.

Согласно лесорастительному районированию [1], леса Архангельской области относятся к 2 зонам и 3 лесным районам. При этом 12,3% их площади занимают притундровые леса и редкостойная тайга [2]. Данная территория входит в состав Арктической зоны РФ [3], что подчеркивает её экологическую ценность и сложность мониторинга из-за труднодоступности.

Специфика притундровых лесов, выражающаяся в замедленных процессах роста, высокой уязвимости и сложности мониторинга, отмечается рядом исследователей [4-6].

Актуальность настоящей работы обусловлена комплексом научно-практических задач, связанных с масштабами лесоучетных работ на труднодоступных территориях лесов. В этих условиях традиционные методы наземной таксации становятся экономически нецелесообразными, что актуализирует развитие дистанционных методов оценки лесного фонда. Д.Ю. Капиталинин и др. (2024) [7] отмечают, что материалы спутниковой съёмки демонстрируют значительный потенциал для решения задач таксации леса.

На современном этапе для изучения труднодоступных территорий перспективна интеграция данных государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), спутниковых технологий и наземных наблюдений для моделирования продуктивности, и динамики лесов [8-11].

Информация с постоянных пробных площадей (ППП) служит незаменимым эталоном для калибровки и верификации дистанционных методов. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка моделей, связывающих таксационные показатели с характеристиками, дешифрируемыми по снимкам. Исследования демонстрируют эффективность использования данных аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения и материалов с БПЛА для оценки структуры древостоев. В.К. Хлюстов и др. (2021) [11] отмечает инвентаризацию леса, как один из основных методов получения объективных данных о состоянии лесного фонда России на основе сети ППП, что устанавливает методологическую базу для исследований на основе данных с применением различных методов.

Л.В. Стоноженко и К.А. Жирнова (2021) [12] в своих исследованиях проводили сравнительную оценку методов наземной таксации, инвентаризации и съемки с БПЛА для выделения однородных участков леса, выявляли корреляционные зависимости между размерами кроны и ствола, а также оценивали точность ортофотопланов на основе данных отдельных деревьев. А. Р. Dalla Corte др (2020) [13] доказывает эффективность автоматизированного дешифрирования для оценивания индивидуальных параметров деревьев с высокой точностью, что является основой для перехода к оценке характеристик всего древостоя.

Особое методологическое значение в этом контексте имеют аллометрические модели, устанавливающие количественные связи между различными параметрами деревьев и насаждений.

Классические работы, такие как правило 3/2 (модель Йоды) и производные от него зависимости Рейнеке и Хильми, представляют собой теоретическую основу для оценки запаса, среднего диаметра и высоты по густоте древостоя.

Современные исследования в области лесной биометрии и дистанционного зондирования активно развивают направление интеграции аллометрических уравнений с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для целей крупномасштабной оценки фитомассы и запаса древесины. Так, А. Не и соавторы (2018) [14] на примере бореальных лесов демонстрируют высокую точность разработанных аллометрических уравнений при оценке наземной биомассы кустарникового яруса. В свою очередь, О. Fradette

с коллегами (2021) [15] обосновывают целесообразность использования аллометрических моделей, включающих показатели высоты и диаметра, для повышения точности оценки биомассы ветвей, что особенно значимо при фракционировании фитомассы.

Параллельно ведётся разработка комплексных параметрических моделей, учитывающих множественные связи между диаметром ствола, высотой дерева и шириной кроны, а также прогнозирующих динамику запаса в зависимости от видового состава древостоев. Особого внимания заслуживает подход, предложенный В.А. Усольцевым (2025) [16], который заключается в построении аллометрических зависимостей между параметрами крон деревьев, дешифрируемыми по данным ДЗЗ, и таксационными характеристиками древостоев. Данный подход открывает возможности для оперативного определения таксационных показателей без проведения трудоёмких наземных измерений, что существенно повышает эффективность лесоинвентаризационных работ на региональном уровне.

Y. Wu и др. (2023) [17] подчеркивают перспективность метода оценки запаса древостоя на основе аллометрической модели роста и данных ДЗЗ, который обладает высокой точностью и оперативностью при оценке таксационных показателей на труднодоступных территориях.

D. Dijak (2025) [18] рассматривает метод прогнозирования изменений запаса древостоев с учетом видового состава и возрастной динамики, что показывает возможность комплексного подхода к моделированию таксационных характеристик, основанный на данных государственной инвентаризации лесов и подтверждает перспективность оценки запаса на основе аллометрической модели роста и данных ДЗЗ.

Однако для арктических лесов притундровой зоны сохраняется пробел в адаптированных аллометрических моделях и методиках, комплексно связывающих данные с постоянных пробных площадей ГИЛ и ДЗЗ для оценки таксационных характеристик.

Цель исследования – разработка моделей оценки основных таксационных характеристик насаждений (запаса, средних диаметра и высоты) ели сибирской (*Picea obovata* L.) притундровых лесов Арктической зоны Архангельской области на основе интеграции данных ГИЛ и снимков высокого разрешения с применением адаптированных аллометрических моделей.

Задачи исследования:

Сформировать репрезентативную базу таксационных данных на основе материалов ГИЛ для притундровых ельников V класса бонитета.

Адаптировать константы (c_1 , c_2 , c_3) аллометрических моделей Йоды, Рейнеке и Хильми для заданных условий.

Выполнить дешифрирование аэрофотоснимков высокого разрешения для определения густоты древостоя на контрольных таксационно-дешифровочных участках.

Разработать алгоритм оценки таксационных показателей, на основе адаптированных аллометрических моделей и данных дистанционного зондирования.

Провести предварительную верификацию разработанной методики дистанционной оценки таксационных характеристик насаждений, на основе адаптированных аллометрических моделей и данных аэрофотосъемки высокого разрешения путём сравнения расчётных значений с эталонными данными государственной инвентаризации лесов (ГИЛ).

Материалы и методы

Объектом исследования были выбраны насаждения Архангельской области сухопутной зоны Арктики. К этой зоне отнесен Мезенский муниципальный район.

Исследуемые притундровые насаждения представлены ненарушенными коренными сообществами. Они формируют смешанные по составу древостои. При доминировании в нем ели сибирской (*Picea obovata* L.), присутствуют всегда сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), береза пушистая (*Betula pubescens* L.), реже лиственница сибирская (*Larix sibirica* L.).

Древостои средне- и низкопродуктивные. Они относятся, в основном, к IV-Va классам бонитета. Относительная полнота находится в диапазоне 0,4-0,6. Число растущих деревьев ели в древостоях различных типов леса изменяется в пределах 120-450 шт/га.

В качестве предмета исследования были выбраны характеристики (средняя высота, средний диаметр насаждений, определенный по числу стволов на единице площади, запас) насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) и их связь с параметрами аллометрических моделей и данными ДЗЗ.

В качестве исходных данных использовались материалы ГИЛ, полученные на территории Мезенского лесничества в 2021 году. Из общего массива была сформирована выборка, включающая 131 постоянную пробную площадь (ППП) и 38 таксационно-дешифровочных участков (ТДУ), соответствующих критерию: наличие в составе древостоя ели сибирской (*Picea obovata* L.) в качестве преобладающей или сопутствующей породы. Для каждого объекта из базы ГИЛ были извлечены базовые таксационные показатели: запас

(M), сумма площадей сечения (G), относительная полнота (p), средняя высота (h), средний диаметр (d). Данная выборка составила эмпирическую основу для последующего моделирования.

Для оценки таксационных характеристик по густоте древостоя была применена система аллометрических моделей, основанная на правиле самоизреживания (правило 3/2). В его частных формах это правило выражается зависимостями Йоды (для запаса), Рейнеке (для среднего диаметра) и Хильми [19] (для средней высоты) от количества деревьев на единице площади.

Исследования А.А. Михайловой (2018) [20] с использованием данной закономерности систематически подвергались экспериментальной проверке, которые подтвердили ее основополагающую корректность с учетом статистически незначимых расхождений с теоретически прогнозируемыми величинами.

В нашем исследовании система аллометрических уравнений, 3/2 (модель Йоды), предполагает аллометрическую зависимость, которая связывает число деревьев и общий (суммарный) запас на единице площади.

Параметры древостоя, с преобладанием ели сибирской (*Picea obovata* L.) были отобраны и сгруппированы по типам леса, бонитету и классам возраста. На основе отобранных данных по ели сибирской (*Picea obovata* L.) была проверена зависимость для расчета общего запаса на единице площади (M) вида:

$$M = c_1 N_{\text{ст}}^{-1/2}, \quad (1)$$

где M – общий запас на единице площади, м³/га;

c_1 – константа, новая постоянная, безразмерная величина, множитель;

N – количество деревьев, шт./га.

Густота, рассчитанная по данным с пробных площадей, используется для калибровки моделей. Расчет густоты для каждой площади проводился по формуле (2) на основе суммы площадей сечения и средней площади сечения ствола.

Поскольку данные ГИЛ не содержат прямых измерений количества деревьев на каждом участке, густота (N) для калибровки моделей была рассчитана через сумму площадей сечений исредней площади сечения ствола по известным в таксации формулам (2,3):

$$N_{\text{ст}} = \frac{G_{\phi}}{g_m}, \quad (2)$$

где N – число стволов на 1 га, шт./га;

G_{ϕ} – фактическая сумма площадей сечений, м²/га;

g_m – средняя площадь сечения, м².

В этом случае фактическая полнота насаждения определялась через относительную полноту и сумму площадей сечений при полноте 1,0.

$$G = pG_{1,0}, \quad (3)$$

где G – сумма площадей сечений;

p – относительная полнота насаждения;

$G_{1,0}$ – сумма площадей сечений, при полноте 1,0, м²/га.

Чтобы исключить существенные отклонения от истинных значений, рассмотренные параметры аллометрических моделей, полученных на основе пробных площадей ГИЛ было необходимо сделать уточнения с учетом теоретических степеней для нормальных насаждений. Полученные параметры были приведены к условиям нормального древостоя, с использованием формул приведения и учета бонитета.

В рамках общей теории, связанной с правилом 3/2, можно выделить два важных частных следствия, которые выражаются через правила Рейнеке и Хильми, устанавливающие связь между густотой древостоя и его средними таксационными показателями - высотой и диаметром.

Так как данные пробных площадей и таксационно-дешифровочные участки ГИЛ получены инструментальным методом с фиксацией координат деревьев, что позволяет получить расчетные параметры древостоев (густоту и другие) с достаточной точностью.

При обработке данных показатель степени (α) в аллометрических зависимостях был зафиксирован на уровне -0.5 в соответствии с их теоретической основой (правило 3/2). Фиксация этого параметра позволила вычислить искомые региональные коэффициенты c_1 , c_2 и c_3 методом регрессионного анализа. Показатель степени в моделях устанавливался путем проведения регрессионного анализа на основании набора исходных данных в исследовании. Таким образом, были определены параметры уравнения Йоды для расчёта запаса и уравнения Хильми для оценки средней высоты нормальных древостоев по данным о густоте.

Были адаптированы и апробированы частные случаи аллометрического правила-зависимости Рейнеке (для среднего диаметра), которая выражается уравнением (4) и Хильми (для средней высоты) от числа стволов на единицу площади ($N_{ст}$), уравнение (5).

$$h = c_2 N_{ст}^{-1/2} \quad (4)$$

$$d = c_3 N_{ст}^{-1/2}, \quad (5)$$

где c_2 и c_3 – соответствующие константы.

С использованием инструментов регрессионного анализа в MS Excel по массиву данных для ельников V класса бонитета были оценены константы c_1 , c_2 , c_3 в уравнениях (1), (4), (5). В результате для запаса, средней высоты и среднего диаметра получены адаптированные значения констант, характеризующие специфику роста ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровых условиях. Графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рисунках 2-4.

Полученные теоретические зависимости были апробированы на материалах аэрофотосъемки. Основной задачей на этом этапе стала экспериментальная проверка применимости правила 3/2 для оценки запаса насаждений через показатель густоты. Для этого потребовалось определить количество деревьев на единице площади непосредственно по снимкам. В работе использовались аэрофотоснимки высокого разрешения 2022 года.

Обработка материалов аэрофотосъемки и создание ортофотоплана выполнены в программе ScanEx IMAGE Processor. Обработка стереоизображений на изучаемую территорию проведена в программе PHOTOMOD 8.

Анализируемая площадь представляет собой небольшую территорию, поэтому основные таксационные характеристики исследуемой территории были установлены дешифровочным методом в стереорежиме. Был составлен проект в PHOTOMOD с ортофотопланом изучаемой территории и импортированы геопривязанные ППП, которые представлены на рисунке 1.

Для апробации полученных параметров уравнения Йоды были использованы таксационные данные деревьев с нескольких пробных площадей ГИЛ.

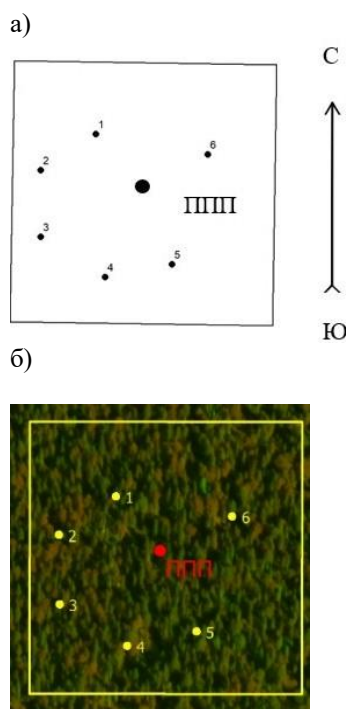


Рисунок 1. Схема размещения таксационно-дешифровочных участков на пробной площади: а) схематический чертеж, б) геопривязанное размещение со снимком высокого разрешения в координатах WGS-84

Figure 1. The layout of the taxation and decryption sites on the test area: а) schematic drawing, б) geo-linked placement with a high-resolution image in coordinates WGS-84

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Дешифрирование данного аэрофотоснимка заключалось в сверке с данными пробных площадей ГИЛ и последующее определение густоты насаждения на каждой из них.

Существует множество способов для определения густоты древостоя [21]. В рамках нашего исследования для определения количества деревьев по каждой пробной площади производился сплошной подсчет деревьев, расположенных в границах геопривязанных площадок. Выполнена верификация подсчёта на часть участков по стереомодели по наземным данным.

В таблице 4 представлен фрагмент результатов перечёта деревьев по ортофотоплану, на основании которых проводилась апробация полученных параметров уравнения Йоды.

В последующем определялась густота древостоя на 1 га, путем деления полученного количества деревьев на площадь ТДУ.

Рассчитанные по предлагаемой методике величины общего запаса насаждений на единице

площади были сравнены с данными пробных площадей о густоте насаждения, определенной по аэрофотоснимку.

Важным этапом исследования являлось определение относительной полноты насаждений для каждой пробной площади. Для ее определения использовали при дешифрировании стереорежим. Последовательность действий по определению относительной полноты в программе PHOTOMOD предусмотрена инструкцией для дешифрирования насаждений. Выделим ключевые моменты методики. В процессе дешифрирования выполняется визуальная оценка относительной площади, занимаемой проекциями крон деревьев на общую площадь таксационного дешифровочного ТДУ. Анализ подлечат свободные от проекций крон участки, видимые на изображении.

Сомкнутость полога определялась автоматически в среде PHOTOMOD путем наложения регулярной сетки точек и расчета доли точек, попавших в проекции крон. В притундровых насаждениях наличие в пологе остроконечных крон (ель) создает эффект более низкой полноты. Так как еловым насаждениям свойственна разновысотность и некоторые кроны еловых насаждений на изображении могут быть скрыты берёзой. Недочет скрытых на снимках деревьев может приводить к ошибкам. Переход от сомкнутости полога к относительной полноте осуществлялся с помощью эмпирического коэффициента, полученного по данным обучающей выборки.

Поэтому важным элементом методики является обязательное использование наземных данных обучающей выборки с пробных площадей для установления локальных эмпирических поправок, связывающих дешифрируемые признаки с реальными таксационными показателями.

На завершающем этапе для каждой пробной площади на основе данных инвентаризации были определены возраст насаждений и класс бонитета (по средней высоте и возрасту). Итоговый расчет общего запаса проводился с использованием правил 3/2, Рейнеке и Хильми, а также табличных данных (таблицы 1-3).

Результаты

В результате регрессионного анализа данных ППП государственной инвентаризации лесов для притундровых насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) Архангельской области были получены адаптированные параметры уравнений: для запаса древостоев ($c_1=3279.63$, $R^2=0.816$), среднего диаметра ($c_2=404.76$, $R^2=0.703$) и средней высоты ($c_3=298.47$, $R^2=0.550$), которые связывают таксационные показатели с густотой древостоя для 5 класса бонитета (таблицы 1-3).

Полученные эмпирические уравнения статистически значимы ($p < 0.05$) и позволяют адекватно оценивать таксационные показатели в исследованном диапазоне количества деревьев на единицу площади (200–1000 дер./га), которые представлены на рисунках 2-4.

Наилучшее соответствие эмпирическим данным, согласно коэффициенту детерминации, R^2 , демонстрирует модель для диаметра ($R^2=0.7028$). Для запаса и высоты дисперсия составила 0.663 и 0.550 соответственно. Модель для объема дерева показала средний уровень зависимости от густоты ($R^2=0.663$).

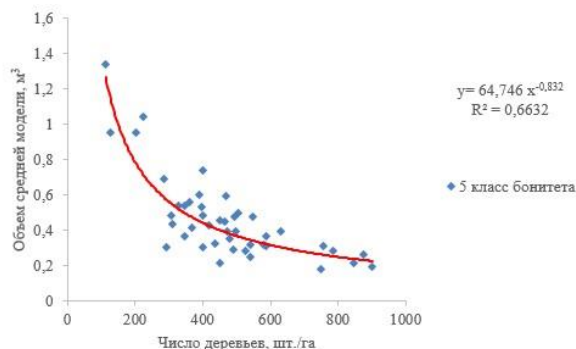


Рисунок 2. Зависимость объема средней модели дерева от густоты древостоя для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровой зоне Архангельской области, 5 класс бонитета

Figure 2. Dependence of the volume of the average tree model on the density of the stand for stands of Siberian spruce (*Picea obovata* L.) in the tundra zone of the Arkhangelsk region, bonus class 5

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

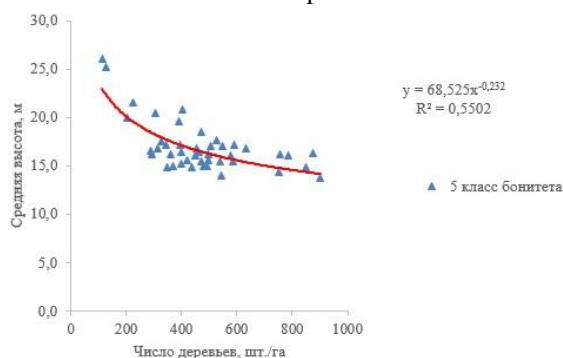


Рисунок 3. Зависимость среднего диаметра от густоты древостоя для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровой зоне Архангельской области, 5 класс бонитета

Figure 3. Dependence of the average diameter on the density of the stand for stands of Siberian spruce (*Picea obovata* L.) in the tundra zone of the Arkhangelsk region, bonus class 5

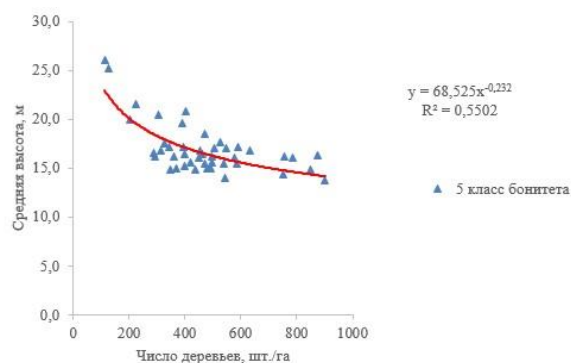


Рисунок 4. Зависимость средней высоты от густоты древостоя для насаждений ели сибирской (*Picea obovata* L.) в притундровой зоне Архангельской области, 5 класс бонитета

Figure 4. Dependence of the average height on the density of the stand for stands of Siberian spruce (*Picea obovata* L.) in the tundra zone of the Arkhangelsk region, bonus class 5

Таблица 1

Параметры аллометрической модели Йоды ($\alpha = -0.5$) для оценки общего запаса нормальных древостоев ели сибирской по густоте

Table 1

Parameters of the Yoda allometric model ($\alpha = -0.5$) for estimating total stock of normal Siberian spruce stands from stand density

Класс бонитета / Порода Bonity class / Breed	Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> L.) Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	
	c_1	R_2
V	3279	0,816

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 2

Коэффициенты аллометрической модели Рейнеке ($\alpha = -0.5$) для оценки среднего диаметра нормальных древостоев ели сибирской по густоте

Table 2

Coefficients of the Reineke allometric model ($\alpha = -0.5$) for estimating mean diameter of normal Siberian spruce stands from stand density

Класс бонитета / Порода Bonity class / Breed	Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> L.) Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	
	c_3	R_2
V	405	0,703

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 3

Коэффициенты аллометрической модели Хильми ($\alpha = -0.5$) для оценки средней высоты нормальных древостоев ели сибирской по густоте

Table 3

Coefficients of the Hilmi allometric model ($\alpha = -0.5$) for estimating mean height of normal Siberian spruce stands from stand density

Класс бонитета / Порода Bonity class / Breed	Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> L.) Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	
	c_2	R_2
V	298	0,550

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 4

Результаты пересчета деревьев на ТДУ по аэрофотоснимку

Table 4

Results of tree counting on TDU based on aerial photographs

Номер пробы Sample number	Количество деревьев, шт. Number of trees, pcs
12335001	481
12404301	755
12406701	396
12417101	490
12402101	632

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 5

Сравнение таксационных показателей, рассчитанных по аллометрическим моделям на основе данных ДЗЗ, с эталонными данными ГИЛ

Table 5

Comparison of stand characteristics calculated from allometric models based on remote sensing data with the ground truth data of the State Forest Inventory

Данные ГИЛ data from the State forest inventory	Номер ТДУ TDU number	Запас насаждения, м³/га Plant stock, m³/ha		Средний диаметр, см Average diameter, cm		Средняя высота, м Average height, m	
	12402101	125,3		18,8		14,8	
	12404301	70,4		15,0		13,0	
	12406701	121,3		18,4		15,2	
	12417101	164,5		19,2		14,8	
Результаты расчетов	Номер ТДУ TDU number	Запас насаждения, м³/га Plant stock, m³/ha		Средний диаметр, см Average diameter, cm		Средняя высота, м Average height, m	
	12402101	119,2		20,1		13,1	
	12404301	74,9		13,7		11,4	
	12406701	132,6		20,0		14,6	
	12417101	154,8		20,5		16,3	
Отклонения по запасу, средним по диаметру и высоте	Номер ТДУ TDU number	Запас насаждения, м³/га Plant stock, m³/ha		Средний диаметр, см Average diameter, cm		Средняя высота, м Average height, m	
		м³/га m³/ha	%	см cm	%	м	%
	12402101	6,1	-4,9	1,3	6,9	1,7	-11,5
	12404301	4,5	6,4	1,3	-8,7	1,6	-12,3
	12406701	11,3	9,3	1,6	8,7	0,6	-3,9
	12417101	9,7	-5,9	1,3	6,8	1,5	10,1

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Обсуждение

Проведённое исследование позволило адаптировать классические аллометрические модели (Йоды, Рейнеке, Хильми) для оценки таксационных характеристик низкопродуктивных ельников V класса бонитета сухопутной зоны Арктики по данным ГИЛ. Апробация методики на контрольных участках выявила как её потенциал, так и систематические источники погрешности, требующие детального рассмотрения.

Сравнение расчётных значений с эталонными данными ГИЛ, представленными в таблице 5 показывает, что модель наиболее точно оценивает запас: абсолютные отклонения составили 4,5–11,3 м³/га (–5,9...+9,3%). Для среднего диаметра ошибки находятся в диапазоне 1,3–1,6 см (–8,7...+8,7%), что коррелирует с наибольшим коэффициентом детерминации ($R^2=0,703$) среди адаптированных зависимостей.

Наибольшие относительные расхождения характерны для оценки средней высоты (до $\pm 12,3\%$), что подтверждается низкой объясняющей способностью модели Хильми ($R^2=0,550$). Это указывает на специфику роста деревьев в экстремальных климатических условиях Арктики. Зависимости демонстрируют, что высота деревьев в притундровых насаждениях в меньшей степени регулируется внутривидовой конкуренцией

Заключение

Таким образом, получены адаптированные константы (c_1 , c_2 , c_3), которые количественно отражают сниженную продуктивность северных лесов, а предложенный алгоритм демонстрирует перспективность для предварительной оценки запаса.

Однако для оперативного применения методики необходимы: учёт смешанного состава (породное дешифрирование или введение

(густотой) и в большей – возрастом и условиями местопрорастания.

Показатель степени в уравнениях был зафиксирован эмпирически –0,5 для обеспечения сопоставимости с классическими работами и сохранения биологического смысла правила 3/2.

Отметим ключевое ограничение, что исследуемые насаждения формируют смешанные по составу древостои, в которых доминирует ель сибирская (*Picea obovata* L.), присутствует всегда сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), береза пушистая (*Betula pubescens* L.), реже лиственница сибирская (*Larix sibirica* L.). Адаптированные модели были выведены для ели, однако дешифрирование густоты по снимкам проводилось для всего древостоя. Это напрямую влияет на все рассчитываемые по моделям параметры, так как густота является ключевой переменной в уравнениях. Это приводит к систематическому завышению входного параметра в уравнения (1, 4, 5) и, как следствие, к смещению оценок.

Модели калиброваны для нормальных (полнотных) древостоев, в то время как реальная относительная полнота исследуемых насаждений составляет 0,4–0,6. Применение моделей для данных насаждений без поправки на полноту закономерно приводит к ошибке.

поправочных коэффициентов); разработка более точной модели перехода от сомкнутости к полноте для данного типа насаждений; апробация на существенно расширенной выборке контрольных участков для статистически значимой.

Перспективы развития данного подхода связаны с его дальнейшим совершенствованием и всесторонней апробацией на расширенной выборке данных притундровых лесов сухопутной зоны Арктики.

Список литературы

1. Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации от 18.08.2014 № 367 (ред. от 02.08.2023) // КонсультантПлюс: справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590/ff850d27514bc742e55aa77db5c6ac1998f0a75e/ (дата обращения: 15.01.2026). – Текст: электронный.
2. Об утверждении Лесного плана Архангельской области: Указ Губернатора Архангельской области от 14.12.2018 № 116-у (ред. от 15.12.2021) // Официальный интернет-портал правовой информации Архангельской области. – URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=123136569&page=1&rdk=1#I0 (дата обращения: 30.01.2025). – Текст: электронный.
3. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 (ред. от 05.03.2020) // КонсультантПлюс: справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/ (дата обращения: 15.01.2026). – Текст: электронный.

4. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Производительность и возобновление насаждений притундрового леса в Республике Коми // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2022. – № 6(58). – С. 71-77. – DOI: <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2022-6-71-77>.
5. Гаврильева Л.Д. Воздействие геологоразведочных работ на растительность подзоны притундровых лесов // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 5. – С. 28-31. – DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-28-31>.
6. Богданов А.П., Третьяков С.В., Цветков И.В. Оценка точности определения запаса в молодняках и средневозрастных древостоях по результатам наблюдений на стационарных объектах в Мурманской области различными способами // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 5. – С. 13-18. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38035>.
7. Капиталинин Д.Ю., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С. Оценка качества таксации по результатам лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки Sentinel-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 251. – С. 62-77. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.62-77>.
8. Бердов А.М., Федоров С.В., Приставко А.А. Анализ результатов первого цикла государственной инвентаризации лесов и предложения по совершенствованию методики ее проведения во втором цикле // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 3. – С. 67-80. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06>.
9. Порядок проведения государственной инвентаризации лесов (утвержден приказом Минприроды России от 14.11.2016 – № 592). – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420383930> (дата обращения: 12.01.2026).
10. Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов (утверждены приказом Рослесхоза от 10.11.2011 № 472, в редакции приказа Рослесхоза от 15.03.2018 № 173). – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902325555> (дата обращения: 12.01.2026).
11. Хлюстов В.К., Ганихин А.М., Хлюстов Д.В. Новая методика и аналитическая система дистанционной инвентаризации лесов // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 2. – С. 51-63. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37574>.
12. Стоноженко Л.В., Жирнова К.А. Синхронизация наземных и дистанционных методов исследования лесных насаждений // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2020. – Т. 8, № 3(50). – С. 62-68. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44561163>.
13. Dalla Corte A.P., Souza D.V., Rex F.E., Sanquetta C.R., Mohan M., Silva C.A., Zambrano A.M.A., Prata G., Almeida D.R.A., Trautenmüller J.W., Klauber C., Moraes A., Sanquetta M.N., Wilkinson B. & Broadbent E.N. *Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes*. Computers and Electronics in Agriculture. 2020; 179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>.
14. He A., McDermid G.J., Rahman M.M., Strack M., Saraswati S. & Xu B. *Developing Allometric Equations for Estimating Shrub Biomass in a Boreal Fen*. Forests. 2018; 9 (9): 569. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090569>.
15. Fradette O., Marty C., Tremblay P., Lord D. & Boucher J.-F. *Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in Afforested Open Woodlands with Black Spruce and Jack Pine, in the Eastern Canadian Boreal Forest*. Forests. 2021; 12 (1): 59. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12010059>.
16. Усольцев В.А. Модели для оценки диаметра стволов деревьев и древостоев лесообразующих видов Северной Евразии по морфометрии крон и полога. Лесоведение. – 2025.- Т.3.- С. 304–320. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114825030022>.
17. Wu Y., Mao Z., Guo L., Li C. & Deng L. *Forest Volume Estimation Method Based on Allometric Growth Model and Multisource Remote Sensing Data*. Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2023; 16: 8900–8912. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3313251>.
18. Dijk J. *Predicting Timber Board Foot Volume Using Forest Landscape Model and Allometric Equations Integrating Forest Inventory Data*. Forests. 2025; 16 (3): 543. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16030543>.

19. Хильми Г.Ф. Теоретическая биогеофизика леса. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 205 с.
20. Михайлова А.А., Вагизов М.Р. Методика обработки данных дистанционного зондирования земли с применением информационных технологий и аллометрических зависимостей для определения лесотаксационных показателей древостоев // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 4. – С. 80-85. – URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36729>.
21. Руководство по таксации лесов дешифровочным способом: метод. положения лесного стереоскопического дешифрирования аэрокосмических изображений (снимков) / сост.: В.И. Архипов, В.И. Басков, В.А. Белов, В.И. Березин, Д.М. Черниковский; под общ. ред. Д.М. Черниковского. – Санкт-Петербург: ООО «Леспроект», 2021. – Ч. 1–4. – [2] 99 с.

References

1. On approval of the List of Forest Vegetation Zones of the Russian Federation and the List of Forest Regions of the Russian Federation: Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 367 dated 18.08.2014 (ed. 02.08.2023). ConsultantPlus. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169590/ (accessed: 15.01.2026).
2. On approval of the Forest Plan of the Arkhangelsk Region: Decree of the Governor of the Arkhangelsk Region No. 116-u dated 14.12.2018 (ed. 15.12.2021). Official Internet Portal of Legal Information of the Arkhangelsk Region. http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=123136569&page=1&rdk=1#10 (accessed: 30.01.2025).
3. On the Land Territories of the Arctic Zone of the Russian Federation: Presidential Decree No. 296 dated 02.05.2014 (ed. 05.03.2020). ConsultantPlus. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162553/ (accessed: 15.01.2026).
4. Pakhuchiy, V. V., & Pakhuchaya, L. M. (2022). Proizvoditel'nost' i vozobnovlenie nasazhdeniy pritundrovogo lesa v Respublike Komi [Productivity and regeneration of forest-tundra forest stands in the Komi Republic]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, 6(58), 71–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2022-6-71-77>.
5. Gavrilieva, L. D. (2022). Vozdeystvie geologorazvedochnykh rabot na rastitel'nost' podzony pritundrovyykh lesov [Impact of geological exploration on vegetation of the forest-tundra subzone]. *Problemy regional'noy ekologii*, 5, 28–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-28-31>.
6. Bogdanov, A. P., Tretyakov, S. V., & Tsvetkov, I. V. (2023). Otsenka tochnosti opredeleniya zapasa v molodnyakakh i srednevozrastnykh drevostoyakh po rezul'tatam nablyudeniya na statsionarnykh ob'yektakh v Murmanskoy oblasti razlichnymi sposobami [Accuracy assessment of determining the growing stock in young and middle-aged stands based on observations at stationary plots in the Murmansk region by various methods]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 5, 13–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.38035>.
7. Kapitalinin, D. Yu., Sidorenkov, V. M., & Achikolova, Yu. S. (2024). Otsenka kachestva taksatsii po rezul'tatam lesotaksatsionnogo deshifirovaniya dannykh sputnikovoy s"yemki Sentinel-2 [Quality assessment of forest inventory based on results of forest inventory interpretation of Sentinel-2 satellite imagery data]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 251, 62–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.251.62-77>.
8. Berdov, A. M., Fedorov, S. V., & Pristavko, A. A. (2020). Analiz rezul'tatov pervogo tsikla gosudarstvennoy inventarizatsii lesov i predlozheniya po sovershenstvovaniyu metodiki ee provedeniya vo vtorom tsikle [Analysis of the results of the first cycle of the state forest inventory and proposals for improving the methodology for its implementation in the second cycle]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 3, 67–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06>.
9. Poryadok provedeniya gosudarstvennoy inventarizatsii lesov [Procedure for Conducting State Forest Inventory] (approved by Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 592 dated 14.11.2016). ConsultantPlus. <https://docs.cntd.ru/document/420383930> (accessed: 12.01.2026).

10. Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu gosudarstvennoy inventarizatsii lesov [Methodological Recommendations for Conducting State Forest Inventory] (approved by Order of the Federal Forestry Agency No. 472 dated 10.11.2011, as amended by Order No. 173 dated 15.03.2018). ConsultantPlus. <http://docs.cntd.ru/document/902325555> (accessed: 12.01.2026).
11. Khlustov, V. K., Ganikhin, A. M., & Khlustov, D. V. (2021). Novaya metodika i analiticheskaya sistema distantsionnoy inventarizatsii lesov [New methodology and analytical system for remote forest inventory]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2, 51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37574>.
12. Stonozhenko, L. V., & Zhirnova, K. A. (2020). Sinkhronizatsiya nazemnykh i distantsionnykh metodov issledovaniya lesnykh nasazhdeniy [Synchronization of ground and remote methods for studying forest stands]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 8(3), 62–68. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44561163>.
13. Dalla Corte, A. P., Souza, D. V., Rex, F. E., Sanquetta, C. R., Mohan, M., Silva, C. A., Zambrano, A. M. A., Prata, G., Almeida, D. R. A., Trautenmüller, J. W., Klauber, C., Moraes, A., Sanquetta, M. N., Wilkinson, B., & Broadbent, E. N. (2020). Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>.
14. He, A., McDermid, G. J., Rahman, M. M., Strack, M., Saraswati, S., & Xu, B. (2018). Developing Allometric Equations for Estimating Shrub Biomass in a Boreal Fen. *Forests*, 9(9), 569. <https://doi.org/10.3390/f9090569>.
15. Fradette, O., Marty, C., Tremblay, P., Lord, D., & Boucher, J.-F. (2021). Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in Afforested Open Woodlands with Black Spruce and Jack Pine, in the Eastern Canadian Boreal Forest. *Forests*, 12(1), 59. <https://doi.org/10.3390/f12010059>.
16. Usoltsev, V. A. (2025). Modeli dlya otsenki diametra stvolov derev'ev i drevostoev lesobrazuyushchikh vidov Severnoy Evrazii po morfometrii kron i pologa [Models for estimating stem diameter of trees and stands of forest-forming species in Northern Eurasia based on crown and canopy morphometry]. *Lesovedenie*, 3, 304–320. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114825030022>.
17. Wu, Y., Mao, Z., Guo, L., Li, C., & Deng, L. (2023). Forest Volume Estimation Method Based on Allometric Growth Model and Multisource Remote Sensing Data. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 8900–8912. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3313251>.
18. Dijak, J. (2025). Predicting Timber Board Foot Volume Using Forest Landscape Model and Allometric Equations Integrating Forest Inventory Data. *Forests*, 16(3), 543. <https://doi.org/10.3390/f16030543>.
19. Khil'mi, G. F. (1957). *Teoreticheskaya biogeofizika lesa* [Theoretical Biogeophysics of the Forest]. Izdatel'stvo AN SSSR. (In Russ.).
20. Mikhailova, A. A., & Vagizov, M. R. (2018). Metodika obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli s primeneniem informatsionnykh tekhnologii i allometricheskikh zavisimostei dlya opredeleniya lesotaksatsionnykh pokazatelei drevostoev [Methodology for processing remote sensing data using information technologies and allometric dependencies to determine forest taxation indicators of stands]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 4, 80–85. (In Russ.). <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36729>.
21. Arkhipov, V. I., Baskov, V. I., Belov, V. A., Berezin, V. I., & Chernikhovskiy, D. M. (Comp.). (2021). *Rukovodstvo po taksatsii lesov deshifrovochnym sposobom: metodicheskie polozheniya lesnogo stereoskopicheskogo deshifirovaniya aerokosmicheskikh izobrazheniy (snímkov)* [Guidelines for Forest Inventory by Interpretation Method: Methodological Provisions for Forest Stereoscopic Interpretation of Aerospace Images]. Part 1–4. ООО «Lesproekt». (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Харитоновна Зинаида Александровна* – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», ул. Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID:<https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>, e-mail: zvekshina@mail.ru.

Коптев Сергей Викторович – доктор с.-х. наук, зав. кафедрой лесоводства и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», ул. Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

Information about the authors

✉ *Zinaida A. Kharitonova* – post graduate student of department of silviculture and forest management, Arkhangelsk North (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb., 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1538-9691>, e-mail: zvekshina@mail.ru.

Sergey V. Koptev – Dr. Sci. (Agric.), Head of silviculture and forest management department, Arkhangelsk North (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb., 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/9>

УДК 630* 624.131.4:624.138.22



Экспериментальное исследование эволюции поля напряжений в грунте при катковом уплотнении

Дмитрий В. Васильев¹, uasya-1993@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>
Альберт М. Бургонутдинов¹, burgonutdinov.albert@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>
Евгений В. Сибиряткин², jeu-sib@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>
Ольга А. Куницкая³, ola.ola07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>
Евгений А. Тихонов⁴, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹ ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Комсомольский просп., д. 29, г. Пермь, 614990, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

⁴ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

В статье рассматривается проблема отсутствия детерминированной модели, связывающей эволюцию поля напряжений в грунте с кинетикой наработки плотности при многопроходном катковом уплотнении, что актуально для оптимизации строительства лесных дорог. Целью работы является установление количественных закономерностей этого процесса для разработки критериев выбора технологических параметров. Для её достижения была разработана комплексная методика полевого эксперимента, основанная на синхронной регистрации интегральных характеристик (осадка, плотность) и компонент напряжённо-деформированного состояния с помощью тензометрических датчиков и метода меловых маяков. Исследования проводились на супеси, суглинке и щебне при варьировании толщины слоя, скорости движения и числа проходов.

В результате экспериментально выделены три стадии эволюции напряжённого состояния, отражающие переход от пластических деформаций к упругим. Установлен универсальный затухающий гиперболический характер зависимости максимального нормального напряжения от числа проходов, описываемый моделью $\sigma_{\max} = N / (a + bN)$. Обнаружена двугорбая форма эпюры касательных напряжений и выявлена значительная анизотропия релаксации остаточных напряжений: горизонтальные напряжения исчезают за 18–20 часов, в то время как вертикальные релаксируют почти мгновенно. Полученные результаты углубляют теорию контактного взаимодействия и предоставляют практические критерии для определения оптимального числа проходов и сроков контроля качества уплотнения.

Ключевые слова: лесные дороги, уплотнение грунта, катковое уплотнение, поле напряжений, остаточные деформации, контроль качества

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства»

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Экспериментальное исследование эволюции поля напряжений в грунте при катковом уплотнении / Д. В. Васильев, А. М. Бургонутдинов, Е. В. Сибиряткин, О. А. Куницкая, Е. А. Тихонов // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 127–140. – Библиогр.: с. 137–139 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/9>.

Поступила 14.09.2025. Пересмотрена 15.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Experimental investigation of stress field evolution in soil under roller compaction

Dmitry V. Vasilyev¹, uasya-1993@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>

Albert M. Burgonutdinov¹, burgonutdinov.albert@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>

Evgeny V. Sibiryatkin²,  jey-sib@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>

Olga A. Kunitskaya³, ola.ola07@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Evgeny A. Tikhonov⁴, tihonov@petsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

¹ Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation

³ Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoye highway, 3 km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

⁴ Petrozavodsk State University, 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

Abstract

The article examines the problem of the absence of a deterministic model linking the evolution of the stress field in the soil with the kinetics of density gain during multi-pass roller compaction, which is relevant for optimizing the construction of forest roads. The purpose of the work is to determine the quantitative patterns of this process to develop criteria for selecting technological parameters. To achieve this purpose, an integrated field experiment methodology was developed, based on the synchronous registration of integral characteristics (sediment, density) and the stress-strain state component using tensometric sensors and the chalk beacon method. Studies were conducted on sandy loam, loam, and gravel, varying the thickness of the layer, the speed of movement, and the number of passes. As a result, three stages of stress state evolution were experimentally identified, reflecting the transition from plastic deformations to elastic ones. The universal damped hyperbolic nature of the dependence of the maximum normal stress on the number of passages, described by the model $\sigma_{\max} = N / (a + bN)$, has been revealed. The two-humped form of the tangential stresses diagram was discovered, and a significant anisotropy of residual stress relaxation was revealed: horizontal stresses disappear within 18-20 hours, while vertical stresses relax almost instantaneously. The obtained results deepen the theory of contact interaction and provide practical criteria for determining the optimal number of passes and the timing of compaction quality control.

Keywords: forest roads, soil compaction, roller compaction, stress field, residual deformations, quality control

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

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

For citation: Vasiliev D. V., Borgonutdinov A. M., Sibiryatkin E. V., Kunitskaya O. A., Tikhonov E. A. (2026). Experimental investigation of stress field evolution in soil under roller compaction. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 127–140 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/9>.

Received 14.09.2025.

Revised 16.01.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

Несмотря на длительную историю эксплуатации вибрационных катков в дорожном строительстве, в научно-технической сфере сохраняется дефицит консенсуса относительно оптимальных параметров данной техники, объективных критериев оценки её технологической эффективности и рациональных режимов работы в

разнообразных производственных условиях [1, 2]. Эта неоднозначность обусловлена фундаментальной сложностью и недостаточной изученностью физических процессов, сопровождающих вибрационное уплотнение. К ним относятся: нелинейное поведение грунтовой среды, характеристики которой динамически изменяются от прохода к проходу; комплексное взаимодействие элементов колебательной системы катка как между

собой, так и с деформируемым основанием; значительное разнообразие типов грунтов и технологических контекстов, в которых осуществляется уплотнение [2].

Динамическое взаимодействие вибрационного катка с грунтовым основанием представляет собой сложный процесс, определяемый совокупностью технических параметров машины и реологических свойств уплотняемой среды. Ключевыми факторами со стороны катка являются масса вальца и рамы, частота и амплитуда колебаний, геометрические характеристики вальца, параметры амортизирующей системы и скорость передвижения. Со стороны грунта существенное влияние оказывают его тип, гранулометрический состав, начальная плотность, влажность и мощность уплотняемого слоя. В рамках экспериментального исследования эволюции поля напряжений для строительства лесных дорог принципиально важным является выбор адекватного математического аппарата, способного описать отклик нелинейной, многофазной среды на циклическое динамическое воздействие.

Физическая сущность вибрационного катка как многомассовой колебательной системы, работающей в контакте с деформируемым основанием, обуславливает применение методов реологического моделирования. Эти методы позволяют аппроксимировать поведение системы через совокупность сосредоточенных масс, упругих, вязких и пластических элементов, моделирующих как свойства техники, так и грунта. Эволюция напряжённо-деформированного состояния в процессе многократных проходов катка может быть проанализирована через призму развития таких моделей.

Исторически первым и наиболее простым подходом явилось использование одномассных моделей, в которых основное внимание уделялось динамике самого рабочего органа [3, 4, 5]. Однако подобные схемы обладали ограниченной предсказательной силой, так как не учитывали обратного влияния деформируемого грунта на характер колебаний. Развитием методологии стало внедрение двухмассных моделей, которые позволили рассматривать систему «валец–грунт» как единое целое [6, 7, 8]. Эти модели стали важным шагом в понимании передачи энергии от катка в массив и формирования начального поля напряжений. Для более глубокого анализа распространения волн напряжений по глубине и оценки присоединённой массы вовлекаемого в движение грунтового массива были предложены трёхмассные реологические схемы [12, 13, 14]. Подобное усложнение модели повышает её адекватность при описании второй фазы

взаимодействия — распространения и затухания напряжений в глубине уплотняемого слоя, что особенно важно для обоснования оптимальной толщины отсыпаемого слоя на лесных дорогах.

Среди разнообразия реологических схем для аппроксимации поведения грунта фундаментальное значение сохраняет линейная вязкоупругая модель Фойгта. Её широкое применение, включая анализ виброплит [11] и динамику фундаментов [24, 25, 26], основано на удачном балансе между аналитической простотой и возможностью описания ключевых релаксационных свойств грунта. Применительно к вибрационным каткам, модель Фойгта эффективно описывает формирование контактных напряжений и их динамику при однократном нагружении [5, 12, 13]. Эмпирические исследования, охватывающие широкий спектр грунтов, показывают, что для значительного числа случаев линейная модель даёт удовлетворительное соответствие экспериментальным данным [27]. Это подтверждает её пользу для моделирования «характерного цикла нагружения» — ключевого элемента в изучении кумулятивного эффекта от многократных проходов.

Однако для всестороннего описания эволюции поля напряжений, особенно на стадиях интенсивного пластического деформирования и при уплотнении специфических грунтов (например, заторфованных или переувлажнённых), линейные модели могут быть недостаточны. В таких случаях привлекаются более сложные нелинейные реологические конструкции [18, 19, 20], способные учитывать пластическое течение, упрочнение материала и зависимость параметров от уровня и скорости нагружения. Развитие этих моделей [21, 22, 23] направлено на создание инструмента, позволяющего не только фиксировать, но и прогнозировать кинетику изменения поля напряжений и связанной с ним плотности грунта в процессе всего цикла уплотнения, что является конечной целью оптимизации технологии строительства лесных дорог.

Для всестороннего описания эволюции поля напряжений, особенно на стадиях интенсивного пластического деформирования и при уплотнении специфических грунтов (например, заторфованных или переувлажнённых), линейные модели могут быть недостаточны. В таких случаях привлекаются более сложные нелинейные реологические конструкции [18], способные учитывать пластическое течение, упрочнение материала и зависимость параметров от уровня и скорости нагружения. Развитие этих моделей [21-23] направлено на создание инструмента, позволяющего не только фиксировать, но и прогнозировать кинетику изменения поля напряжений и связанной с ним плотности грунта в процессе всего цикла

уплотнения, что является конечной целью оптимизации технологии строительства лесных дорог.

Современные исследования, направленные на решение этой задачи, реализуют комплексный подход, опирающийся на симбиоз трёх ключевых направлений: технологий интеллектуального уплотнения, методов машинного обучения и численного моделирования [19]. Прогресс в области интеллектуального уплотнения (ИУ) предоставляет необходимую эмпирическую основу. Оборудованные акселерометрами и GNSS-приёмниками катки в режиме реального времени фиксируют отклик грунта, формируя плотный поток объективных данных о его жёсткости, которая тесно коррелирует с плотностью, для каждого прохода и участка [20]. Современные системы управления, такие как Bomag Variocontrol, не только собирают эти данные, но и автоматически адаптируют параметры работы (например, амплитуду вибрации), обеспечивая равномерное уплотнение [21].

Для трансформации собранных данных в прогнозные модели активно применяются алгоритмы машинного обучения (МО). Ансамблевые методы, такие как градиентный бустинг (XGBoost), демонстрируют высокую точность ($R^2 > 0.9$) в предсказании ключевых параметров уплотнения, включая оптимальную влажность и максимальную плотность, на основе гранулометрического состава и данных Аттерберга [22]. Продвинутые исследования показывают возможность создания глобальных прогнозных моделей, способных оценивать параметры уплотнения связных грунтов для широкого спектра приложенной энергии [23,24].

Таким образом, интеграция данных в реальное время от систем ИУ с физически обоснованными реологическими моделями через инструментарий машинного обучения формирует основу для создания адаптивной системы управления. Такая система позволяет перейти от эмпирического подбора режимов к научно обоснованному прогнозу и оптимизации всего цикла уплотнения, что является определяющим фактором для строительства долговечных лесных дорог.

понимании дискретных фаз взаимодействия «каток-грунт» и в развитии методов корреляции данных [1, 2, 17, 18, 19, 23]. Однако ключевой научной проблемой остаётся отсутствие детерминированной количественной модели, связывающей пространственно-временную эволюцию поля напряжений (эволюцию нормальных и касательных компонент) с кинетикой накопления плотности в материале в процессе всего цикла многопроходного уплотнения. Существует разрыв между пониманием единичного цикла нагружения [5, 12, 13] и способностью

прогнозировать кумулятивный технологический эффект для разнородных грунтов в условиях строительства лесных дорог.

Настоящее экспериментальное исследование направлено на преодоление этого пробела. Его целью является установление количественных закономерностей эволюции напряжённо-деформированного состояния (НДС) в дорожно-строительных материалах при катковом уплотнении для разработки критериев оптимизации технологических параметров.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать и апробировать комплексную методику полевого эксперимента, позволяющую преодолеть методологическое ограничение, связанное с невозможностью прямого неразрушающего контроля плотности в фиксированной точке после каждого прохода.
2. Экспериментально исследовать стадийность процесса уплотнения на основе синхронной регистрации интегральных характеристик (вертикальная осадка, плотность) и компонент НДС (нормальные и касательные напряжения) в массиве грунта.
3. Выявить и математически описать функциональные зависимости между технологическими параметрами (число проходов, толщина слоя, скорость) и эволюцией ключевых параметров поля напряжений.
4. Исследовать характер релаксации остаточных напряжений в уплотнённом слое и оценить их влияние на процедуру контроля конечной плотности.

В основе исследования лежит **гипотеза** о том, что процесс уплотнения представляет собой последовательную смену качественно различных фаз механического поведения грунтовой среды, объективно фиксируемую через трансформацию поля напряжений. Предполагается, что эволюция напряжённого состояния характеризуется тремя стадиями, соответствующими переходу от пластических деформаций к упругим, а зависимость пиковых напряжений от числа проходов носит затухающий гиперболический характер. Также гипотезой предусматривается, что релаксация остаточных напряжений обладает выраженной анизотропией, что необходимо учитывать при оценке результатов уплотнения.

Материалы и методы

Программа экспериментальных исследований была направлена на изучение процесса уплотнения дорожно-строительных материалов катками. Исследования включали проведение контролируемых полевых экспериментов.

1. Объекты исследования

В качестве уплотняемых материалов были выбраны:

- Супесчаный грунт (однородный по гранулометрическому составу).
- Лёгкий суглинок (испытывался в наиболее широком диапазоне режимов).
- Щебень двух типов: гранитный и известковый.

2. Подготовка экспериментального участка и материалов

Эксперименты проводились на специально подготовленном участке лесовозной дороги. Полоса длиной 30 м и шириной 4 м была спланирована в горизонтальной плоскости с нивелирным контролем и предварительно уплотнена до относительной плотности 0.98 от максимальной стандартной (по ГОСТ). Для фиксации геометрии слоя и размещения измерительной аппаратуры по границам полосы была установлена деревянная обноска. Исследуемый материал укладывался ровным слоем заданной толщины (контролируемой по обноске). Перед испытанием отбирались пробы для определения исходных физико-механических характеристик: гранулометрического состава, плотности в рыхлом состоянии, влажности и др. Влажность материалов поддерживалась в оптимальном диапазоне: для суглинка — 13–17%, для супеси — 10–12%.

3. Методика проведения процесса уплотнения

Уплотнение осуществлялось последовательно двумя самоходными катками: первые 8–10 проходов выполнялись катком массой 3.7 т, последующие 11–20 проходов — катком массой 10 т. Процесс продолжался до прекращения наблюдаемой осадки слоя и прироста его плотности. Исследовались следующие варьируемые параметры (табл.1.).

Для всесторонней оценки процесса уплотнения применялся комплекс методов, направленный на параллельную регистрацию интегральных (результатирующих) характеристик уплотняемого слоя и локальных параметров его напряжённо-деформированного состояния (НДС). Мониторинг интегральных деформационно-прочностных характеристик включал контроль вертикальной осадки, плотности грунта и геометрии поверхности. Вертикальная осадка слоя фиксировалась после каждых двух проходов катка с помощью высокоточного нивелирования или механического прогибомера, обеспечивавшего точность до 1 мм. Плотность грунта определялась с аналогичной периодичностью; первичные замеры выполнялись стандартным методом режущих колец (ГОСТ 28514-90) с последующим лабораторным анализом, что гарантировало точность до 0.01 г/см³.

4. Методы контроля и измерительная аппаратура

Для построения непрерывной зависимости плотности от числа проходов без разрушения структуры в контрольной точке использовался косвенный калибровочный метод, основанный на корреляции с измеряемыми напряжениями и осадками. Геометрия поверхности опытной полосы фиксировалась геодезическим нивелированием до начала, выборочно в процессе и после завершения уплотнения.

Исследование напряжённо-деформированного состояния в массиве грунта основывалось на косвенном подходе, что было обусловлено методологической невозможностью прямого неразрушающего измерения распределения плотности в одной точке после каждого цикла нагружения. Суть подхода заключалась в изучении динамики полей напряжений для последующего установления эмпирических корреляционных связей с конечной плотностью. Для раздельной регистрации нормальных (σ) и касательных (τ) напряжений применялись специально разработанные тензометрические датчики (мессдозы) с гидравлическим преобразователем. Чувствительные элементы этих датчиков, выполненные в виде плоских камер, заполнялись рабочей жидкостью; давление жидкости, пропорциональное механическому напряжению, преобразовывалось в электрический сигнал. В подготовленный слой на различных глубинах было установлено восемь датчиков. Четыре горизонтально ориентированных датчика предназначались для измерения вертикальных нормальных напряжений, а ещё четыре вертикально установленных датчика фиксировали горизонтальные касательные напряжения. Все датчики располагались в одной вертикальной плоскости вдоль направления движения катка с шагом 1 метр между точками измерений. Процедура измерений учитывала различие в картине НДС, формируемой ведомым и ведущим вальцами, поэтому замеры проводились раздельно для каждого вальца при его нахождении над контролируемой точкой. Аналоговые электрические сигналы с датчиков в реальном времени записывались на фоторегистрирующем осциллографе, а для оперативного визуального контроля при каждом чётном проходе катка фиксировались показания микроамперметра, включённого в измерительную цепь.

Таблица 1

Варьируемые параметры процесса уплотнения

Table 1

Variable parameters of the sealing process

Материал / Material	Толщина уплотняемого слоя, см / Compacted Layer Thickness, cm	Скорость движения катка, км/ч / Roller Speed, km/h	Влажность, W _o % / Moisture Content, W _o %	Примечания / Remarks
Легкий суглинок / Light Loam	15	0,45; 0,60; 0,90	13–17	Проводились комплексные измерения напряжений и горизонтальных подвижек / Comprehensive measurements of stresses and horizontal displacements were conducted
	20	0,45; 0,60; 0,90	13–17	Проводились комплексные измерения напряжений и горизонтальных подвижек / Comprehensive measurements of stresses and horizontal displacements were conducted
	25	0,45; 0,60; 0,90	13–17	Проводились комплексные измерения напряжений и горизонтальных подвижек / Comprehensive measurements of stresses and horizontal displacements were conducted
Супесчаный грунт / Sandy Loam	20	Данные не указаны / Not specified	10–12	Проведена одна базовая серия опытов / One baseline test series was conducted
Щебень (гранитный и известковый) / Crushed Stone (Granite & Limestone)	15	0,45; 0,60; 0,90	–	
	22	0,45; 0,60; 0,90	–	

Для прямой экспериментальной оценки величины и характера горизонтальных смещений частиц грунта по глубине был применён метод меловых индикаторных маяков. Маяк представлял собой монолитный цилиндр, предварительно сформированный из сухого порошкообразного мела, диаметром 30 мм и высотой, строго равной толщине уплотняемого слоя. Вертикальные колонны-маяки устанавливались в шурфы до начала укатки, а после завершения процесса уплотнения в местах их закладки производились продольные раскопки (разрезы). Деформированное состояние маяков документировалось путём зарисовок, фотографирования и точного замера линейных смещений их отдельных участков, что позволило

количественно оценить эпюру распределения горизонтальных сдвигов по глубине уплотняемого слоя.

5. Порядок проведения серии опытов и обоснование методологии

Каждая серия экспериментов представляла собой завершённый цикл, начинавшийся с подготовки материала в строго нормированных начальных условиях и заканчивавшийся комплексом измерений на уплотнённом состоянии. После фиксации всех конечных параметров уплотнённого слоя — геодезической съёмки поверхности, демонтажа и контроля показаний тензометрических датчиков, а также вскрытия и документации

деформации меловых маяков — материал подвергался тщательному разрыхлению. Последующая подготовка к новому опыту, включавшая повторное увлажнение, перемешивание и укладку слоя заданной толщины, обеспечивала идентичность его начального состояния. Этот циклический характер процедуры был фундаментальным условием, гарантирующим воспроизводимость результатов и позволяющим проводить сравнительный анализ влияния варьируемых технологических параметров (толщины слоя, скорости движения, числа проходов) при прочих равных начальных условиях.

Избранный комплексный методологический подход, интегрирующий традиционные методы контроля интегральных характеристик с прямыми измерениями напряженно-деформированного состояния (НДС) и визуализацией внутренних сдвигов, был обусловлен необходимостью преодоления ключевого методического противоречия. Прямое послойное определение плотности в одной и той же точке после каждого прохода катка является деструктивным методом, который нарушает структуру материала и делает невозможным наблюдение за его реакцией на последующие воздействия. Предложенная методика устраняет это ограничение путем перехода от прямой регистрации плотности к изучению её косвенных, но непрерывно измеряемых коррелятов — полей механических напряжений и картин смещений. Такой косвенный корреляционный подход позволил неинвазивно, в реальном масштабе времени эксперимента, отслеживать физическую сущность процесса уплотнения — перераспределение и уплотнение скелета грунта под внешней нагрузкой. Установление количественных связей между динамикой напряжений, величиной горизонтальных подвижек и конечными деформационно-прочностными показателями слоя создает фундаментальную основу для разработки физически обоснованных критериев оптимизации, таких как рациональная толщина отсыпаемого слоя и энергетически эффективные режимы работы уплотняющей техники при строительстве лесных дорог.

Результаты

Реализация разработанной комплексной методики, основанной на синхронном мониторинге интегральных параметров и компонент напряженно-деформированного состояния (НДС), позволила получить принципиально новые результаты в исследовании кинетики процесса уплотнения дисперсных материалов. Применение данного подхода обеспечило не только количественную характеристику конечного состояния уплотнённого

массива, но и возможность реконструкции полной динамики его формирования, что открыло путь к установлению фундаментальных физических закономерностей данного технологического процесса.

Ключевым научным достижением работы стало экспериментальное выявление и обоснование трёх последовательных характерных стадий эволюции поля механических напряжений в грунтовом слое при его уплотнении цилиндрическим катком. Данная стадийность объективно отражает фазовый переход механического поведения материала от режима развитого пластического течения к преобладанию упругого отклика.

Первая стадия (начального формообразования) соответствует начальному воздействию катка. На этом этапе регистрируется интенсивное накопление остаточных (пластических) деформаций при минимальном вкладе деформаций упругих. Распределение (эпюра) контактных нормальных напряжений σ_{zz} носит резко выраженный асимметричный характер относительно вертикальной оси зоны контакта, с чётко локализованным максимумом, смещённым в направлении движения рабочего органа.

Вторая стадия (активного упрочнения) наступает с увеличением числа проходов и сопровождается прогрессирующим ростом плотности грунта. Наблюдается закономерное увеличение абсолютной величины максимальных нормальных напряжений (σ_{max}). При этом, вследствие повышения однородности и несущей способности материала, происходит постепенное уменьшение асимметрии эпюры напряжений.

Третья стадия (стабилизации) формируется по завершении процесса плотностного уплотнения, когда приращение плотности материала становится пренебрежимо малым. Деформирование на этой стадии носит исключительно упругий, обратимый характер. Величина σ_{max} достигает своего предельного, стабильного значения и далее не зависит от количества дополнительных проходов катка. Эпюра напряжений асимптотически приближается к симметричному виду. Важно отметить, что момент стабилизации величины σ_{max} находится в строгом соответствии с моментом стабилизации коэффициента сопротивления перекатыванию катка, что указывает на установление динамического равновесия в системе «рабочий орган – уплотняемая среда».

Таким образом, представленные результаты дают целостную физическую картину процесса уплотнения, устанавливая однозначную корреляцию между макроскопическими силовыми параметрами

процесса, эволюцией поля напряжений и фазовыми изменениями в поведении материала.

1. Зависимость максимального нормального напряжения от числа проходов

Анализ изменения $\sigma_{\max}$ в зависимости от числа проходов катка (N) при уплотнении слоев различной толщины (15, 20, 25 см) и различных скоростях движения показал затухающий характер этой зависимости.

В качестве иллюстрации приведены данные для слоя толщиной 15 см при скорости 0.90 км/ч.

Значения $\sigma_{\max}$ на различной относительной глубине (0.25H, 0.5H, 0.75H, H) демонстрируют однотипную динамику, различаясь абсолютными величинами. Так, при первом проходе напряжения составляли 2.94, 1.805, 1.28, 1.24 кгс/см² соответственно. К третьему проходу они возросли в ~1.5 раза (4.08, 2.558, 2.03, 1.99 кгс/см²). При пятом проходе рост относительно третьего замедлился до 1.1 раза, а к седьмому и девятому проходам составил лишь 1.02 и 1.01 раза соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения максимального нормального напряжения ($\sigma_{\max}$) для слоя H=15 см, V=0.90 км/ч

Table 2

Average values of maximum normal stress ($\sigma_{\max}$) for a layer with H=15 cm, V=0.90 km/h

Число проходов, N / Number of Passes, N	$\sigma_{\max}$, опытное, кгс/см ² / $\sigma_{\max}$, experimental, kgf/cm ²	N/ $\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}$, расчетное, кгс/см ² / $\sigma_{\max}$, calculated, kgf/cm ²	Отклонение, кгс/см ² / Deviation, kgf/cm ²
1	1.82	0.5494	1.90	+0.08
3	2.67	1.1232	2.66	-0.01
5	2.90	1.7241	2.88	-0.02
7	2.96	2.3365	2.97	+0.01
9	3.02	2.9805	3.021	

Источник/Source: расчеты авторов / authors' calculations.

На основании характера кривой, асимптотически приближающейся к постоянному значению, зависимость $\sigma_{\max}(N)$ была аппроксимирована уравнением гиперболического типа:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{a_4 + b_4 N}. \quad (1)$$

Линеаризация зависимости (1) в координатах N/ $\sigma_{\max}$ от NN подтвердила адекватность выбранной модели, так как экспериментальные точки легли на прямую линию (рис. 1).

Обработка данных методом наименьших квадратов для приведенного примера позволила определить коэффициенты $a_4=0.2168$, $b_4=0.3052$. Таким образом, расчетная формула приняла вид

$$\frac{N}{\sigma} = a_4 + b_4 N. \quad (2)$$

Построив на графике точки с координатами $x = N$ и $y = \frac{N}{\sigma}$ убедились, что все точки располагаются почти на одной прямой, что служит доказательством правильности нашего предположения. Составив систему уравнений по данным опыта, определяем значение коэффициентов " a_4 " и " b_4 "

$$0,5494 = a_4 + b_4. \quad (3)$$

$$1,2320 = a_4 + 3b_4. \quad (4)$$

$$1,7241 = a_4 + 5b_4. \quad (5)$$

$$2,3365 = a_4 + 7b_4. \quad (6)$$

$$2,9805 = a_4 + 9b_4. \quad (7)$$

$$3,397 = 3a_4 + 9b_4. \quad (8)$$

$$5,3170 = 2a_4 + 16b_4. \quad (9)$$

Решая эту систему получим $a_4 = 0.2168$; $b_4 = 0,3052$ окончательно

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{0.2168 + 0.3052N}. \quad (10)$$

Аналогичные расчеты, выполненные для всех серий опытов, подтвердили универсальность уравнения (1) для различных толщин уплотняемого слоя и скоростей движения катка.

2. Характер изменения касательных напряжений

Экспериментально установлено, что эпюра касательных напряжений (τ), возникающих в элементарном объеме грунта при проходе катка, имеет двугорбый вид с двумя максимумами: τ_1 (до прохода оси катка) и τ_2 (после прохода оси катка) (Рисунок 1). Это свидетельствует о двукратном возникновении и смене направления касательных напряжений в частице за один цикл нагружения.

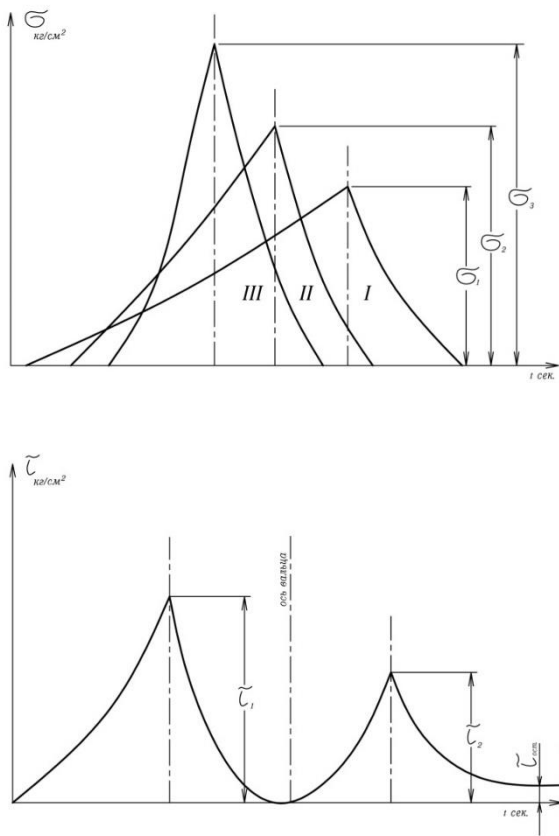


Рисунок 1. Эпюра касательных напряжений
Figure 1. Tangential stress plot

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Источник: составлено авторами

Наибольшие пластические подвижки частиц наблюдались при первом проходе, когда грунт находился в рыхлом состоянии, несмотря на минимальные величины t . С увеличением числа проходов и ростом плотности, значения t_1 и t_2 возрастали по всей толщине слоя. Однако вследствие одновременного увеличения сил сцепления между частицами, пластические деформации (подвижки) затухали вплоть до полного прекращения.

Величина t_2 во всех опытах составляла 30–50% от t_1 . Рост t_1 и t_2 с уплотнением носил неравномерный характер по глубине: у поверхности слоя напряжение возрастало примерно в 1.5 раза, в то время как у основания — лишь на 10%. Распределение t по глубине было неравномерным: разница между значениями у поверхности и у основания слоя составляла 25–40%. Абсолютные значения максимальных нормальных напряжений превышали максимальные касательные в 3–4 раза.

3. Остаточные напряжения

После снятия нагрузки в уплотненном слое фиксировались остаточные напряжения, обусловленные релаксацией упругих деформаций в вертикальном и горизонтальном направлениях. Скорость релаксации существенно различалась: остаточные вертикальные напряжения исчезали в течение ~1 с, в то время как горизонтальные сохранялись в течение 18–20 часов.

По величине остаточные вертикальные напряжения составляли 2–3% от σ_{max} , а горизонтальные — около 5% от τ_{max} . Указанная анизотропия скорости релаксации связана с различием в условиях восстановления формы: в вертикальном направлении сопротивление оказывает только вес вышележащего грунта, а в горизонтальном — практически неограниченный массив.

Таким образом, для корректной оценки достигнутой плотности отбор проб укатанного грунта рекомендуется производить не ранее чем через 20–24 часа после окончания уплотнения, по завершению процесса релаксации остаточных горизонтальных напряжений.

Обсуждение

Проведённый эксперимент и полученные результаты предоставляют возможность для углублённой интерпретации механизмов, лежащих в основе процесса статического уплотнения связных грунтов цилиндрическим катком. Анализ данных позволяет установить взаимосвязь между наблюдаемыми физическими явлениями, фундаментальными теоретическими положениями механики грунтов и практическими аспектами нормирования дорожно-строительных работ. Выделенные в ходе эксперимента три последовательные стадии уплотнения отражают качественную трансформацию механического поведения грунтовой среды. Начальная стадия, характеризуемая преимущественно пластическими деформациями и асимметричной эпюрой нормальных напряжений, соответствует фазе активного перераспределения и вытеснения газовой фазы из межагрегатных пор системы. С позиций классической механики грунтов это согласуется с моделью развития зон пластичности под действием жёсткого штампа, когда происходит радикальная перестройка скелета грунта. Последующее симметрирование эпюры напряжений и переход к упругой стадии деформирования знаменуют собой формирование нового, более устойчивого состояния грунтового каркаса с повышенным количеством контактов между частицами. На этой стадии дальнейшее удаление воздуха становится крайне затруднительным, что теоретически приближает

систему к предельному состоянию, описываемому кривой оптимального соотношения влажности и плотности для двухфазной «грунтовой массы». Обнаруженная синхронная стабилизация максимального контактного напряжения и коэффициента сопротивления перекачиванию имеет непосредственное практическое значение. Она выступает объективным технологическим критерием, сигнализирующим о достижении предельной для данных условий эффективности уплотнения и, как следствие, определяющим оптимальное число проходов катка, исключающее непроизводительные затраты.

Установленная гиперболическая зависимость между пиковым нормальным напряжением и числом проходов катка находит своё теоретическое обоснование в принципах контактного взаимодействия и нелинейного деформирования дисперсных сред. Затухающий характер роста напряжений является прямым отражением снижения эффективности передачи энергии от рабочего органа к грунтовому основанию по мере его упрочнения и уменьшения доступного объёма удаляемого воздуха. Универсальный вид аппроксимирующей формулы указывает на то, что эмпирические коэффициенты являются интегральными параметрами. Они аккумулируют в себе совокупное влияние ключевых факторов: начальной плотности и влажности грунта, гранулометрического состава, а также параметров воздействия (массы катка, ширины вальца), определяющих статическую линейную нагрузку. Таким образом, данная зависимость служит математической моделью, связывающей технологические параметры процесса с реакцией конкретного грунтового материала.

Полученные данные по распределению касательных напряжений, в частности наличие двух выраженных максимумов, наглядно подтверждают сложный, двухфазный характер контактного воздействия цилиндрического вальца. Эта картина соответствует теоретическим представлениям о зональном деформировании грунта, при котором одновременно происходят процессы сжатия под вальцом и сдвига в прилегающих областях. Выявленная в эксперименте значительная временная анизотропия релаксации остаточных напряжений требует объяснения с позиций реологии грунтов. Неполное удаление воздушной фазы и наличие защемлённого воздуха, характерное даже для качественно уплотнённых связных грунтов, создаёт предпосылки для длительных процессов перераспределения напряжений в скелете. Различная скорость релаксации в разных направлениях может быть обусловлена

анизотропией граничных условий и исходной структуры грунта, а также проявлением таких свойств, как ползучесть и релаксация. Это явление напрямую связывает кратковременный эффект уплотнения с долговременными характеристиками основания — его длительной прочностью и стабильностью деформаций, что является критически важным для прогнозирования эксплуатационной надёжности дорожной конструкции.

Таким образом, экспериментальные результаты обладают высокой степенью внутренней согласованности и хорошо вписываются в существующий теоретический фундамент механики грунтов. Установленные закономерности — от макроскопической стадийности процесса до конкретного вида функциональных зависимостей и особенностей распределения остаточных напряжений — предоставляют не только объяснение физической сути явления, но и практический инструментарий. Они позволяют обоснованно подходить к выбору технологических параметров уплотнения (числа проходов, массы оборудования) в соответствии с типом грунта и требуемыми нормативами, способствуя тем самым оптимизации строительных процессов и обеспечению требуемой долговечности инженерных сооружений.

Заключение

На основании проведенного комплекса экспериментальных исследований процесса статического уплотнения дорожно-строительных материалов катками, включавшего изучение супесчаного грунта, легкого суглинка и щебня, были получены следующие основные выводы, имеющие как теоретическое, так и практическое значение.

1. Разработана и апробирована комплексная методика, преодолевающая ключевое методологическое ограничение — невозможность прямого неразрушающего контроля плотности в одной точке после каждого прохода. Сочетание традиционных методов (нивелирование, режущие кольца) с прямым измерением напряженно-деформированного состояния (НДС) с помощью тензометрических датчиков и визуализацией сдвигов методом меловых маяков позволило установить корреляционные связи между динамикой полей напряжений и конечными деформационно-прочностными характеристиками уплотняемого слоя.
2. Экспериментально установлены три характерные стадии эволюции напряженного состояния в связном грунте при уплотнении, коррелирующие с переходом деформаций из пластических в упругие:

- Начальная стадия: интенсивные остаточные деформации, асимметричная эпюра нормальных напряжений с максимумом, смещенным в сторону движения катка.
 - Стадия развития: рост максимальных нормальных напряжений ($\sigma_{\max}$) при уменьшении асимметрии эпюры.
 - Стадия стабилизации: прекращение прироста плотности, деформации носят упругий характер, $\sigma_{\max}$ достигает постоянного значения, эпюра симметризуется. Момент стабилизации $\sigma_{\max}$ совпадает со стабилизацией коэффициента сопротивления перекачиванию, что может служить объективным критерием окончания эффективного уплотнения.
3. Установлен затухающий гиперболический характер роста $\sigma_{\max}$ от числа проходов катка (N). Получена универсальная для исследованных условий эмпирическая модель вида $\sigma_{\max} = N / (a + bN)$, коэффициенты которой интегрируют влияние свойств материала и режима уплотнения. Выявлена двугорбая форма эпюры касательных напряжений с двумя максимумами (τ_1 и τ_2), что

подтверждает двухфазный характер воздействия цилиндрического вальца.

4. Обнаружена и оценена значительная временная анизотропия релаксации остаточных напряжений. Установлено, что горизонтальные остаточные напряжения ($\approx 5\%$ от $\tau_{\max}$) релаксируют в течение 18–20 часов, в то время как вертикальные ($\approx 2-3\%$ от $\sigma_{\max}$) исчезают практически мгновенно. Это явление обусловлено различием граничных условий и имеет прямое практическое следствие: для корректной оценки достигнутой плотности отбор контрольных проб необходимо производить не ранее чем через 20–24 часа после окончания укатки.

Таким образом, результаты работы углубляют понимание механики статического уплотнения, вносят вклад в теорию контактного взаимодействия рабочего органа с дисперсной средой и предоставляют инженерно-значимые критерии для оптимизации технологических параметров (числа проходов, толщины слоя) и контроля качества при строительстве дорожных оснований.

Список литературы

1. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 202–216. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
2. Tyuremnov I.S., Morev A.S. New Criterion for Continuous Compaction Control Systems by Soil Vibratory Rollers. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_62.
3. Lipinski K. Forced Vibrations in a Dynamic System That Is Damped By a Mechanism Which Trans-Pass Through Its Singular Position. In: Awrejcewicz J. (eds) Perspectives in Dynamical Systems II — Numerical and Analytical Approaches. DSTA 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 454. Springer, Cham, 2024. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56496-3_21.
4. Pistol J., Hager M., Kopf F. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction // Acta Geotech. – 2025. – Vol. 20. – P. 501–517. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>.
5. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades // Shock and Vibration. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–9. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>.
6. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 6(94). – С. 706–716. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>.
7. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Влияние массы вертикального пригруза на амплитуду колебаний вибровальца и виброзащиту рамы дорожного катка // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 9. – С. 30–36.
8. Paulmichl I., Furtmüller T., Adam C., Adam D. Numerical simulation of the compaction effect and the dynamic response of an oscillation roller based on a hypoplastic soil model // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 132. – Art. 106057. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106057>.
9. Li T., Wang G., Zhang Y. Design of Compaction Operation Monitoring System for Intelligent Vibratory Roller Based on Internet of Things // Engineering Proceedings. – 2021. – Vol. 10, № 1. – Art. 50. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11265>.

10. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Аналитическое обоснование кинематических характеристик вибровозбудителя дорожного виброкатка // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 1. – С. 16-22.
11. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control // Smart Construction and Sustainable Cities. – 2023. – Vol. 1. – Art. 2. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>.
12. Rojas-Vivanco J., García J., Villavicencio G., Benz M., Herrera A., Breul P., Varas G., Moraga P., Gornall J., Pinto H. Artificial Intelligence Applied to Soil Compaction Control for the Light Dynamic Penetrometer Method // Mathematics. – 2025. – Vol. 13, № 21. – Art. 3359. – DOI: <https://doi.org/10.3390/math13213359>.
13. Debeleac C.N., Buraga A., Nastac S.M. Experimental and Numerical Study in Dynamic Compaction of Weakly-Cohesive Soils // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 22. – Art. 10129. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210129>.
14. Kurdyumov V.I. et al. [Title of the article] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1045. – Art. 012106. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012106>.
15. Yao J., Yue M., Ma H., Yang C. Wave Propagation Characteristics and Compaction Status of Subgrade during Vibratory Compaction // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 4. – Art. 2183. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042183>.
16. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 1(53). – С. 36–42. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-02-184-189>.
17. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads // Buildings. – 2023. – Vol. 13, № 11. – Art. 2837. – DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>.
18. Shi M. et al. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarse-grained geomaterials: Proposal and comparative study // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 321. – Art. 126375. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>.
19. What Is Intelligent Compaction? // MyConstructionTechnology. – URL: <https://myconstructiontechnology.com/what-is-intelligent-compaction/> (дата обращения: 19.01.2026).
20. Roller Management System // Topcon Positioning Systems. – URL: <https://www.topconpositioning.com/us/en/solutions/infrastructure/earthmoving/intelligent-compaction> (дата обращения: 19.01.2026).
21. Новинки грунтовых катков. Уплотнение грунта. Что нового? // OS1.ru. – 2022. – URL: <https://os1.ru/article/2249-novinki-gruntovyh-katkov-uplotnenie-grunta-chto-novogo> (дата обращения: 19.01.2026).
22. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study / M. Y. et al. // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. number: 24018. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2>.
23. Big data-driven global modeling of cohesive soil compaction across conceptual and arbitrary energies through machine learning / K. Singh et al. // Transportation Geotechnics. – 2024. – Vol. 47. – Art. 101287. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101287>.
24. Интеллектуальные системы Bomag // Komek.ru. – 2018. – URL: <https://www.komek.ru/staty/intellektualnye-sistemy-bomag/> (дата обращения: 19.01.2026).

References

1. Tyuremnov I. S., Shorokhov D. A. Modelirovanie vzaimodeystviya vibratsionnogo katka s uplotnyaemym gruntom. [Modeling the interaction of a vibratory roller with compacted soil]. Vestnik SibADI = Bulletin of SibADI. 2024;21(2):202-216. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
2. Tyuremnov I.S., Morev A.S. New Criterion for Continuous Compaction Control Systems by Soil Vibratory Rollers. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_62.
3. Lipinski K. Forced Vibrations in a Dynamic System That Is Damped By a Mechanism Which Trans-Pass Through Its Singular Position. In: Awrejcewicz J. (eds) Perspectives in Dynamical Systems II — Numerical and Analytical Approaches. DSTA 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 454. Springer, Cham, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56496-3_21.
4. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. An advanced ICMV for vibratory roller compaction. Acta Geotechnica. 2025;20:501–517. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>.
5. Liu L., Liu C., Ai H., Luo J., Zhang W., Wang L. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades. Shock and Vibration. 2021;2021:9589230. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>.

6. Tyuremnov I. S. Analiz tekhnicheskikh kharakteristik razlichnykh tipov udarno-vibratsionnykh gruntouplotnyayushchikh mashin. [Analysis of technical characteristics of various types of impact-vibration soil compacting machines]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University. 2023;20(6):706-716. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>.
7. Tarasov V. N., Boyarkina I. V., Serebrennikov V. S. Vliyanie massy vertikal'nogo prigruga na amplitudu kolebaniy vibroval'tsa i vibrozashchitu ramy dorozhnogo katka. [Influence of the vertical ballast mass on the oscillation amplitude of the vibratory drum and on vibration protection of the roller frame]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Machinery. 2019;(9):30–36. (In Russ.).
8. Paulmichl I., Furtmüller T., Adam C., Adam D. Numerical simulation of the compaction effect and the dynamic response of an oscillation roller based on a hypoplastic soil model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020;132:106057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106057>.
9. Li T., Wang G., Zhang Y. Design of Compaction Operation Monitoring System for Intelligent Vibratory Roller Based on Internet of Things. Engineering Proceedings. 2021;10(1):50. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11265>.
10. Tarasov V. N., Boyarkina I. V., Serebrennikov V. S. Analiticheskoe obosnovanie kinematicheskikh kharakteristik vibrovozbuditelya dorozhnogo vibrokatka. [Analytical justification of the kinematic characteristics of the exciter for a road vibratory roller]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Machinery. 2019;(1):16-22. (In Russ.).
11. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities. 2023;1:2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>.
12. Rojas-Vivanco J., García J., Villavicencio G., Benz M., Herrera A., Breul P., Varas G., Moraga P., Gornall J., Pinto H. Artificial Intelligence Applied to Soil Compaction Control for the Light Dynamic Penetrometer Method. Mathematics. 2025;13(21):3359. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13213359>.
13. Debeleac C.N., Buraga A., Nastac S.M. Experimental and Numerical Study in Dynamic Compaction of Weakly-Cohesive Soils. Applied Sciences. 2024;14(22):10129. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210129>.
14. Kurdyumov V. I., Mal'tsev A. N., Manuylov V. A., Samoylov D. N., Shamray A. P. [Title of the article is required]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;1045:012106. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012106>.
15. Yao J., Yue M., Ma H., Yang C. Wave Propagation Characteristics and Compaction Status of Subgrade during Vibratory Compaction. Sensors. 2023;23(4):2183. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042183>.
16. Shishkin E. A., Smolyakov A. A. Obosnovanie sposoba regulirovaniya kontaktного usiliya vibratsionnogo val'tsa s uplotnyaemym materialom. [Substantiation of the method of adjusting the contact force of the vibrating roller with the material being compacted]. Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies. 2022;(1):36–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-02-184-189>.
17. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads. Buildings. 2023;13(11):2837. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>.
18. Shi M., Zhao L., Zhang D., Cao Z., Xu H., Wang L. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarse-grained geomaterials: Proposal and comparative study. Construction and Building Materials. 2022;321:126375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>.
19. What Is Intelligent Compaction? My Construction Technology. URL: <https://myconstructiontechnology.com/what-is-intelligent-compaction/> (accessed: 19.01.2026).
20. Roller Management System. Topcon Positioning Systems. URL: <https://www.topconpositioning.com/us/en/solutions/infrastructure/earthmoving/intelligent-compaction> (accessed: 19.01.2026).
21. Novinki gruntovykh katkov. Uplotnenie grunta. Chto novogo? [New soil rollers. Soil compaction. What's new?]. OS1.ru. 2022. URL: <https://os1.ru/article/2249-novinki-gruntovyh-katkov-uplotnenie-grunta-cto-novogo> (accessed: 19.01.2026). (In Russ.).
22. Predicting soil compaction parameters in expansive soils using advanced machine learning models: a comparative study. Scientific Reports. 2025;15:24018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09279-2>.
23. Big data-driven global modeling of cohesive soil compaction across conceptual and arbitrary energies through machine learning. Transportation Geotechnics. 2024;47:101287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101287>.
24. Intellektual'nye sistemy Bomag. [Intelligent Bomag systems]. Komek.ru. 2018. URL: <https://www.komek.ru/staty/intellektualnye-sistemy-bomag/> (accessed: 19.01.2026). (In Russ.).

Сведения об авторах

Васильев Дмитрий Вадимович – аспирант ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>, e-mail: uasya-1993@mail.ru.

Бургонутдинов Альберт Масугатович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru.

✉ *Сибиряткин Евгений Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jey-sib@mail.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация, 677007, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Тихонов Евгений Андриянович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

Information about the authors

Dmitry V. Vasiliev – Postgraduate student of Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6417-846X>, e-mail: uasya-1993@mail.ru.

Albert M. Burgonutdinov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, 614990, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru.

✉ *Evgeny V. Sibiryatkin* – postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0475-612X>, e-mail: jey-sib@mail.ru.

Olga A. Kunitskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russian Federation, 677007, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author



Моделирование процесса ленточной подачи саженцев в лесопосадочном аппарате на основе метода дискретных элементов

Михаил В. Драпалюк, michael1@yandex.ru, 0000-0002-8029-2706

Александр В. Школьных , alex.hk525@gmail.com, 0009-0002-3311-5907

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

Проектирование ленточных механизмов подачи саженцев для лесопосадочных машин требует обеспечения надежного захвата без повреждения живых тканей посадочного материала. Традиционные методы натурных испытаний для оптимизации этого процесса являются ресурсоемкими. Цель исследования: Разработка и применение метода дискретных элементов (DEM) для создания детализированной виртуальной модели процесса ленточной подачи, позволяющей провести параметрический анализ силового воздействия. В исследовании разработана комплексная DEM-модель, интегрирующая три подсистемы: дискретную структуру резиновой ленты (упруго-вязкая модель Кельвина-Фойгта), мультисферическую модель саженца с учетом сил изгиба и точную геометрию роликового механизма. Модель реализована в специализированном программном комплексе. Ключевым анализируемым параметром являлась сила поперечного сжатия саженца лентами (F_c). Верификация подтвердила физическую корректность модели. Установлено пространственно-временное распределение силы F_c с выраженными максимумами (до 13.5 Н) в зонах контакта с роликами. Минимальное значение силы (7.5 Н) гарантирует надежное удержание на всей траектории. Сравнение пикового усилия с порогом повреждения тканей хвойных саженцев (15–18 Н) показало запас прочности >20%. Параметрический анализ выявил статистически значимое увеличение среднего усилия на 7.8% при росте скорости лент с 0.5 до 1.0 м/с. Разработанная DEM-модель является эффективным инструментом виртуального прототипирования. Она позволяет проводить многовариантный анализ и оптимизацию конструктивных и режимных параметров ленточного механизма, обеспечивая баланс между надежностью захвата и биомеханической безопасностью саженца, что сокращает затраты на опытно-конструкторские работы.

Ключевые слова: метод дискретных элементов (DEM); лесопосадочная машина; ленточный механизм подачи; силовое воздействие; саженец; математическое моделирование; параметрический анализ; биомеханическая безопасность; виртуальное прототипирование

Финансирование: Исследование выполнено за счет внутривузовского гранта № 15В/25.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Драпалюк, М. В. Моделирование процесса ленточной подачи саженцев в лесопосадочном аппарате на основе метода дискретных элементов / М. В. Драпалюк, А. В. Школьных // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 141–159. – Библиогр.: с. 157–159 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/10>.

Поступила 20.09.2025. Пересмотрена 27.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Article

Modeling the process of belt feeding of seedlings in a forest planting machine based on the discrete element method

Michael V. Drapalyuk, michael1@yandex.ru,  0000-0002-8029-2706

Alexander V. Shkolnykh , alex.hk525@gmail.com,  0009-0002-3311-5907

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

Abstract

Designing belt seedling feeding mechanisms for forest planting machines requires ensuring a reliable grasp without damaging the living tissues of the planting material. Traditional field-testing methods for optimizing this process are resource-intensive. The purpose of the research is to develop and apply the discrete element method (DEM) to create a detailed virtual model of the belt feed process, which allows for parametric analysis of the force effect. The comprehensive DEM model was developed in the research. It integrates three subsystems: the discrete structure of the rubber belt (Kelvin-Voigt elastic-viscous model), the multifarious model of the seedling, taking into account bending forces, and the precise geometry of the roller mechanism. The model is implemented in a specialized software complex. The main analyzed parameter was the force of transverse compression of the seedling by the belts (F_c). Verification confirmed the physical correctness of the model. The spatio-temporal distribution of force F_c with pronounced maxima (up to 13.5 N) in the contact zones with the rollers has been established. The minimum value of the force (7.5 N) guarantees reliable traction throughout the entire trajectory. Comparison of peak force with the threshold for damage to the tissues of coniferous seedlings (15-18 N) showed a strength margin of >20%. Parametric analysis revealed a statistically significant increase in the average force by 7.8% with an increase in the belt speed from 0.5 to 1.0 m/s. The developed DEM model is an effective tool for virtual prototyping. It allows for multi-variant analysis and optimization of the structural and operating parameters of the belt mechanism, ensuring a balance between grabbing reliability and seedling biomechanical safety, which reduces the costs of experimental design work.

Keywords: *discrete element method (DEM); timber planting machine; belt feed mechanism; force impact; seedling; mathematical modeling; parametric analysis; biomechanical safety; virtual prototyping*

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

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

For citation: Drapalyuk M. V., Shkolnykh A. V. (2026). Modeling the process of belt feeding of seedlings in a forest planting machine based on the discrete element method. Forestry Engineering journal. Vol. 16, No. 1 (61), pp. 141–159 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/10>.

Received 20.09.2025. **Revised** 27.01.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Актуальность. Повышение эффективности лесовосстановления является стратегической задачей лесного комплекса, особенно в контексте реализации климатических и экологических проектов [1]. Качество механизированной посадки, как ключевого этапа технологии, напрямую определяет приживаемость культур и экономическую отдачу мероприятий [2]. Посадочный материал (сеянцы, саженцы) представляет собой сложный живой биологический объект, высокочувствительный к механическим повреждениям камбия, корневой шейки и проводящих тканей в процессе его захвата, транспортировки и высадки рабочими органами машины [3,4]. В этой связи критически важной становится задача перехода от эмпирического проектирования лесопосадочной техники к методам, основанным на глубоком понимании и точном прогнозировании силового взаимодействия в системе «машина – растение».

Ленточные механизмы подачи, основанные на фрикционном удержании стебля между двумя синхронно движущимися резиновыми лентами, являются распространенным решением благодаря надежности и возможности обеспечения непрерывного потока посадочного материала [5]. Однако проектирование и настройка таких систем сталкиваются с фундаментальным технологическим противоречием: необходимо гарантировать силу сжатия, достаточную для беспроскальзывающей транспортировки саженца в различных условиях, но не превышающую биохимический предел прочности его живых тканей [6]. Разрешение этого противоречия исключительно методами натурного экспериментирования ресурсоемко, затратно по времени и часто не позволяет выявить скрытые, нелинейные закономерности распределения контактных напряжений.

Анализ современных исследований В последнее десятилетие проектирование агротехнических и лесохозяйственных систем претерпевает цифровую трансформацию, связанную с активным внедрением методов компьютерного моделирования. Метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM), первоначально разработанный для задач механики горных пород [7], стал стандартным инструментом для моделирования процессов, связанных с большими деформациями, сыпучестью и сложным многотельным контактным взаимодействием [8]. Его успешные применения включают моделирование обработки почвы [9], работы сеялок и высевальных аппаратов [10], калибровки семян [11] и взаимодействия рабочих органов с растительными остатками [12-14].

В области лесопосадочных машин значительная часть исследований сфокусирована на

DEM-моделировании почвенных процессов: взаимодействия уплотняющих катков с грунтом, формирования посадочной борозды и оценки тягового сопротивления. Однако комплексное моделирование гибридной системы, объединяющей деформируемую резиновую ленту, вязкоупругий стебель саженца и жесткий роликовый механизм, остается слабо изученной областью. Существующие публикации часто рассматривают саженец как упрощенное твердое тело [16] или фокусируются на кинематике, не учитывая внутренние напряжения в растительных тканях. Это создает существенный пробел между возможностями DEM и актуальными инженерными задачами в лесохозяйственном машиностроении.

Параллельно развивается направление, связанное с моделированием гибких и составных тел в рамках DEM. Разрабатываются усложненные контактные модели для упруго-вязких материалов, методы связывания частиц в волокна и мембраны, а также алгоритмы учета изгибной и крутильной жесткости [18, 19]. Эти наработки открывают путь к созданию высокоадекватных биомеханических моделей растений, параметры которых могут быть определены экспериментально, например, с помощью методов наноиндентификации [20]. Тем не менее, интеграция таких продвинутых моделей в контекст конкретных технологических процессов, таких как ленточная подача, требует специальных исследований и методик валидации [21].

Целью настоящей работы является разработка, верификация и параметрический анализ детализированной DEM-модели ленточного механизма подачи саженцев лесопосадочного аппарата. Модель призвана стать инструментом для количественной оценки пространственно-временного распределения силового воздействия на саженец и оптимизации конструктивных параметров механизма с точки зрения паритета «надежность захвата – сохранность материала».

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые предложена комплексная DEM-модель, интегрирующая три физически разнородные подсистемы: дискретную структуру резиновой ленты с нелинейной упруго-вязкой реакцией, мультисферическую модель саженца с учетом сопротивления изгибу, и детальную полигональную геометрию роликового привода.
2. Разработана и реализована методика расчета ключевого эксплуатационного параметра – силы поперечного сжатия саженца (F_c) – на основе динамического анализа контактных взаимодействий в компьютерном эксперименте.
3. Проведена оценка биомеханической безопасности технологического процесса путем

сопоставления пиковых расчетных усилий с известными данными о пределе прочности тканей саженцев хвойных пород, что позволяет количественно обосновать щадящий режим работы.

Материалы и методы

2.1. Объект моделирования и вычислительная модель

Объектом исследования является процесс захвата, транспортировки и освобождения саженца подающими лентами лесопосадочного аппарата.

Предмет исследования — пространственно-временное распределение силы поперечного сжатия саженца лентами $F_c(x_c, t)$ и ее зависимость от конструктивных параметров механизма.

В рамках DEM каждый компонент системы представлен следующим образом (рисунок 1):

- Резиновые ленты смоделированы как упорядоченный массив сферических элементов диаметром d_3 , упакованных в гексагональную структуру для обеспечения механической изотропии материала. Элементы соединены между собой упруго-вязкими связями, параметры которых определяются физико-механическими свойствами резины.
- Саженец представлен мультисферической цепочкой, состоящей из 14 составных элементов: 3 элемента моделируют корневую систему, 7 элементов — ствол, 3 элемента — крону. Каждый элемент характеризуется двумя

радиусами взаимодействия: малым радиусом r_{im} — для контакта между элементами саженца, и большим радиусом r_{ib} — для контакта с элементами лент. Для каждого типа элементов (корень, ствол, крона) задаются индивидуальные значения радиуса r_{ib} , коэффициентов жесткости и вязкого трения.

- Ролики представлены полигональными моделями: геометрия каждого ролика аппроксимирована сеткой, состоящей из 96 треугольных граней (рисунок 3). Как основная цилиндрическая поверхность, так и конические бортики упрощены до 16 граней. Для ведущих роликов задается закон вращения, обеспечивающий требуемую линейную скорость движения лент; направляющие и натяжные ролики могут иметь статичное положение или свободное вращение.

Основой исследования является метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM). Моделируемая система включает три ключевых физически разнородных компонента: две бесконечные резиновые ленты, систему из шести роликов (ведущих, натяжных, направляющих) и саженец хвойной породы (условно — сосна обыкновенная).

2.2. Математический аппарат

Движение каждого i -го сферического элемента (как части ленты, так и саженца) подчиняется второму закону Ньютона. Система дифференциальных уравнений движения в векторной форме имеет вид:

$$(1) \quad \begin{cases} i = 1 \dots N_3; \quad \zeta = "x", "y", "z"; \\ m_i \frac{d^2 \zeta_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_3} \left(\begin{cases} c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(\zeta_i - \zeta_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{\zeta i} - v_{\zeta j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{\zeta i} - v_{\zeta j}) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right) + \\ 0, r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \end{cases} \right) + \\ + \sum_{j=1}^{N_{II}} \left(\begin{cases} c_{i-P_j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-P_j} \right) \frac{(\zeta_i - \zeta_{i-P_j})}{r_{i-P_j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{\zeta i} - v_{\zeta-P_j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{-P_j}|} + k_{ij}^B (v_{\zeta i} - v_{\zeta-P_j}) c_{ij} \left(r_{i-P_j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), r_{i-P_j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \right) \\ 0, r_{i-P_j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \end{cases} \right) - m_i g_{\zeta}, \end{cases}$$

где i — номер элемента; ζ — обобщенное обозначение декартовой переменной (может принимать значения "x", "y", "z"); N_3 — количество элементов; m_i — масса элемента; t — время; j — номер элемента, возможно контактирующего с i -м элементом; c_{ij} — коэффициент жесткости взаимодействия элементов i и j (рассчитывается через объемный модуль упругости материала ленты) k_{ij}^C и k_{ij}^B — коэффициенты сухого трения элементов i и j друг о друга; d_i — диаметр i -го элемента; r_{ij} — расстояние между центрами элементов i и j ; α_0 — коэффициент ограничения взаимодействия между элементами (определяется для материала по пределу прочности на разрыв); N_{II} — количество элементарных поверхностей роликов; c_{i-P_j} , $k_{i-P_j}^C$ и $k_{i-P_j}^B$ — коэффициенты жесткости, сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента i с поверхностью j ; r_{i-P_j} — расстояние от центра i -го элемента до j -й поверхности; x_{i-P_j} , y_{i-P_j} , z_{i-P_j} — декартовы координаты точки-проекции центра элемента i на поверхность j ; $v_{\zeta-P_j}$ — компоненты скорости центра j -й элементарной поверхности; $|\dots|$ — модуль вектора; g_{ζ} — ускорение свободного падения. Условия $r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}$ и $r_{i-P_j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}$ под знаком суммы означают, что суммирование производится только по тем парам элементов или элементов с поверхностями, для которых выполнено условие контакта (взаимное перекрытие не превышает предельно допустимой величины).

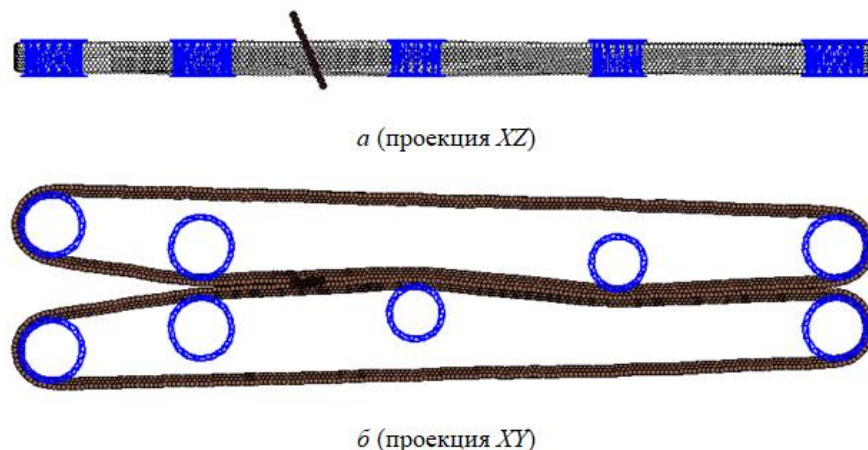


Рисунок. 1. Представление в модели подающих лент, роликов и саженца

Figure 1. Representation of feed belts, rollers and seedlings in the model

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Расстояние r_{ij} между центрами элементов рассчитывается на каждом шаге интегрирования по теореме Пифагора:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2)$$

Коэффициент жесткости взаимодействия элементов c_{ij} определяется с использованием объемного модуля упругости материала ленты E :

$$c_{ij} = E \cdot \frac{\pi d_3}{4} \cdot k_3 \quad (3)$$

где d_3 – диаметр элемента; k_3 – коэффициент пространства, учитывающий несплошность упаковки сферических элементов.

2.3. Формирование дискретной структуры лент

Подготовка лент и лентопротяжного механизма в модели производится в несколько этапов, обеспечивающих равномерное и плотноупакованное расположение сферических элементов.

Генерация плоского полотна. На начальном этапе создается незамкнутое полотно ленты путем заполнения объема параллелепипеда размером $L_n \times B_n \times H_n$ (где L_n – длина полотна, B_n – ширина ленты, H_n – толщина ленты). Для формирования гексагональной структуры, обеспечивающей механическую изотропию материала, размещение элементов производится с использованием следующих выражений:

$$\begin{cases} x_i = (k + 1) \cdot 0,1 + j \cdot 0,05 + n \cdot 0,05, \\ y_i = (2j + 1) \cdot 0,0866025 + n \cdot 0,0288675, \\ z_i = 2n \cdot (0,0866025 - 0,005), \end{cases} \quad (4)$$

где k, j, n – целые числа, последовательный перебор которых позволяет получить гексагональную упаковку элементов.

Из бесконечной гексагональной структуры полотна ленты составляют только элементы, координаты которых удовлетворяют системе неравенств, ограничивающих расчетную область размерами полотна.

Замыкание ленты. Далее полотно сворачивается круговым образом, и его концы соединяются с образованием замкнутой ленты (рисунок 2, а). Преобразование координат из декартовой системы в цилиндрическую осуществляется по формулам:

$$\begin{cases} \varphi_i = 2\pi \frac{x_i^0}{L_n + d/2}, \\ r_i = \frac{L_n + d/2}{2\pi} + y_i^0 - y_{\min}, \\ x_i = x_{\text{ц}} + r_i \cdot \cos \varphi_i, \\ y_i = y_{\text{ц}} + r_i \cdot \sin \varphi_i, \end{cases} \quad (5)$$

где φ_i и r_i – полярные координаты элементов замкнутой круговой ленты; x_i^0, y_i^0 – координаты элемента до преобразования; d – диаметр элемента; $y_{\min}$ – минимальная из координат y_i^0 ; $x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}$ – координаты центра окружности, на которую сворачивается лента. Координата z элементов при данном преобразовании не изменяется: $z_i = z_i^0$.

Поскольку лентопротяжный механизм включает две ленты, после создания и замыкания первой ленты аналогичным образом создается и замыкается вторая лента, при этом координаты центров замкнутых лент смещены в направлении оси x (рисунок 2, а).

Монтаж лент на роликовый механизм.

После создания замкнутых лент производится их натяжение на ролики и сближение (рисунок 2, б–ж). Сначала два вращающихся ролика смещают каждую ленту в противоположных направлениях по оси y (рисунок 2, б, в), в результате чего ленты оказываются параллельны друг другу на некотором расстоянии (рисунок 2, г). Затем перемещением роликов в пространстве ленты растягиваются и сближаются до требуемой конфигурации (рисунок 2, д, е). На завершающем этапе добавляются остальные четыре ролика, лентопротяжный механизм приводится в окончательную конфигурацию, и лента приходит в состояние динамического равновесия (рисунок 2, ж).

Перемещение роликов происходит в четыре этапа; на каждом этапе центры роликов движутся по линейному закону:

$$\begin{cases} x_{pi}(t) = x_{pi1} + (x_{pi2} - x_{pi1}) \frac{t - t_{p1}}{t_{p2} - t_{p1}}, \\ y_{pi}(t) = y_{pi1} + (y_{pi2} - y_{pi1}) \frac{t - t_{p1}}{t_{p2} - t_{p1}}, \\ z_{pi}(t) = \text{const}, \end{cases} \quad (6)$$

где $x_{pi}(t), y_{pi}(t), z_{pi}(t)$ – координаты центра i -го ролика в момент времени t ; (x_{pi1}, y_{pi1}) и (x_{pi2}, y_{pi2}) – начальные и конечные координаты центра ролика на данном этапе перемещения; t_{p1}, t_{p2} – моменты времени, соответствующие начальному и конечному положению ролика.

Описанный способ позволяет создать ленты, структура и свойства которых симметричны относительно оси кругового расположения и инвариантны вдоль полотна ленты.

2.4. Моделирование саженца и учет изгибных свойств

При исследовании ленточного механизма подачи один саженец захватывается лентами (рисунок 4, а), перемещается вдоль механизма (рисунок 4, б) до момента его освобождения (рисунок 4, в). В реальной конструкции лента в лесопосадочном устройстве наклонена под углом около 25° к горизонту, чтобы освобождаемый саженец попадал в посадочную борозду. В модели используется обратный принцип: лента расположена

горизонтально, а саженец отклонен на 25° от направления ленты; соответствующим образом отклонен и вектор ускорения свободного падения (рисунок 5, а).

Взаимодействие элементов саженца между собой, а также с элементами лент описывается той же контактной моделью (формула 1). Однако для корректного воспроизведения изгибных свойств саженца дополнительно учитываются силы изгиба в последовательных тройках элементов (рисунок 5, в). В модели принято, что силы изгиба пропорциональны смещению центрального элемента от линии, соединяющей центры двух соседних элементов. Данный подход позволяет воспроизвести упругое сопротивление стебля изгибу при прохождении криволинейных участков траектории.

2.5. Программная реализация и параметры моделирования

Для проведения численных экспериментов разработан специализированный программный комплекс на языке Object Pascal. Интерактивная среда программы (рисунок 6) обеспечивает визуализацию процесса транспортировки саженца, задание контролируемых параметров модели (коэффициенты жесткости, вязкости и трения, скорости движения лент), а также экспорт расчетных данных для последующего анализа.

Вычислительные эксперименты выполнялись на рабочей станции с процессором Intel Core i7-12700 (3.6 ГГц) и оперативной памятью 32 Гб. Интегрирование системы уравнений движения выполнялось методом Рунге–Кутты второго порядка с фиксированным шагом по времени $\Delta t = 10^{-5}$ с, величина которого выбиралась из условия устойчивости численного решения Куранта–Фридрихса–Леви.

Для обеспечения статистической достоверности каждый сценарий моделирования воспроизводился в трех независимых повторностях с последующим осреднением полученных значений силовых и кинематических характеристик и расчетом стандартных отклонений.

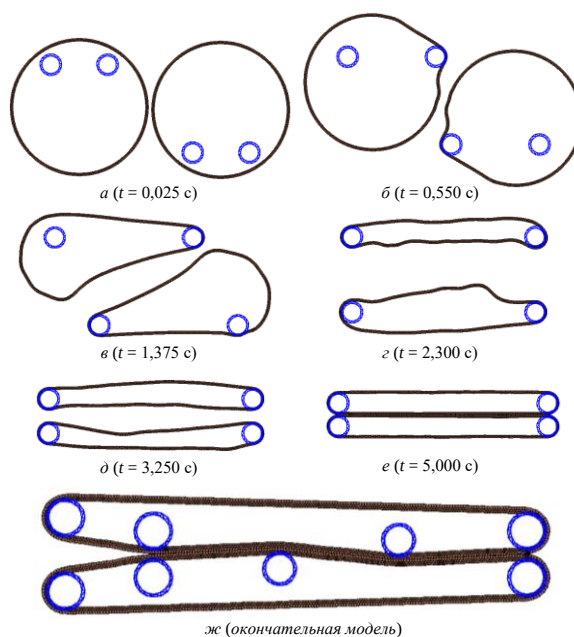


Рисунок 2. Последовательность состояний в процессе подготовки ленты и лентопротяжного механизма перед началом основного компьютерного эксперимента

Figure 2. Sequence of states in the process of preparing the tape and tape transport mechanism before the start of the main computer experiment

Источник: Собственные вычисления авторов/

Source: Authors' own calculations

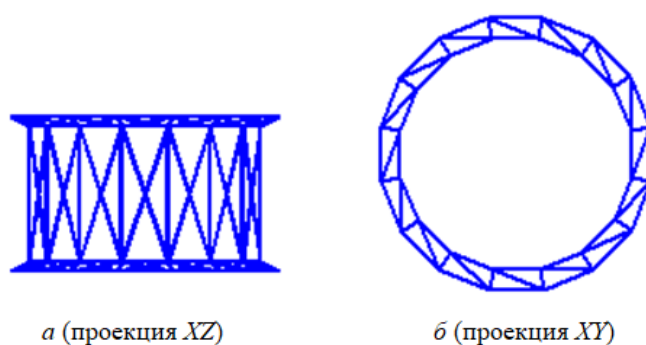


Рисунок 3. Представление роликов в модели как совокупности треугольников

Figure 3. Representation of rollers in the model as a set of triangles

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

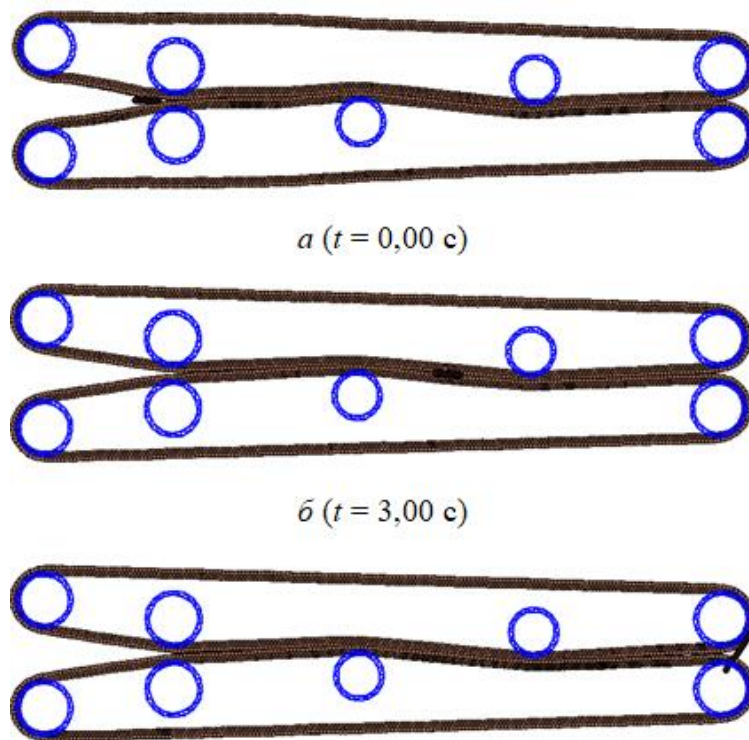


Рисунок 4. Последовательные состояния механизма подачи при перемещении саженца
Figure 4. Sequential states of the feed mechanism when moving a seedling

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

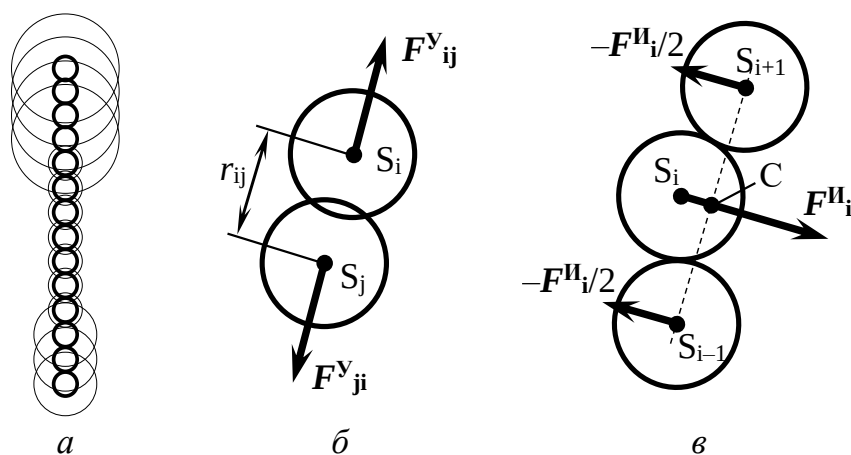


Рисунок 5. Мультисферическое представление саженца в модели: представление саженца в виде ряда сдвоенных шарообразных элементов (а); схема для расчета упругих сил при взаимодействии элементов саженца (б); схема для расчета возвращающих сил при изгибе саженца (в)

Figure 5. Multispherical representation of a seedling in the model: representation of a seedling as a series of paired spherical elements (a); diagram for calculating elastic forces during the interaction of seedling elements (b); diagram for calculating restoring forces during bending of the seedling (c)

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

2.3. Алгоритм компьютерного эксперимента и подготовка модели

Реализация численного моделирования процесса транспортировки саженца требует последовательного формирования расчетной области и задания начальных условий, обеспечивающих физическую непротиворечивость вычислительного эксперимента. Подготовка модели и проведение исследований осуществлялись в соответствии с разработанным алгоритмом, включающим четыре последовательных этапа (рисунок 6), каждый из которых решает специфические задачи по приведению системы в состояние, адекватное реальному технологическому процессу.

Этап 1. Генерация дискретной структуры лент. На первом этапе выполнялось формирование дискретной структуры бесконечных резиновых лент, представляющих собой упорядоченный массив сферических элементов. Плоское полотно создавалось путем заполнения объема параллелепипеда с линейными размерами, соответствующими длине, ширине и толщине ленты, сферическими элементами диаметром d_3 . Упорядочение элементов производилось по правилу гексагональной плотной упаковки с использованием кинематических соотношений (3), что обеспечивает механическую изотропию моделируемого материала и равномерное распределение контактных связей между соседними элементами. После завершения формирования плоской структуры осуществлялось преобразование координат элементов из декартовой системы в цилиндрическую путем свертки полотна круговым образом с последующим соединением концов, в результате чего образовывалась замкнутая непрерывная лента, готовая к последующему монтажу на роликовый механизм. Математическая реализация данного преобразования описывается системой уравнений (5).

Этап 2. Натяжение и сближение лент. Для приведения лент в рабочее состояние, соответствующее их реальной конфигурации в лесопосадочном аппарате, осуществлялось имитационное моделирование процесса монтажа на роликовый механизм. Посредством программного управления положением натяжных роликов, перемещаемых по линейному закону в соответствии с выражением (6), производилось последовательное растяжение и сближение двух замкнутых лент до достижения заданной пространственной конфигурации. На данном этапе интегрирование уравнений движения (1) продолжалось до установления статического равновесия системы, критерием завершения которого служила стабилизация суммарной кинетической энергии всех дискретных элементов лент на уровне, не

превышающем порогового значения $E_{\text{кин}} < 10^{-5}$ Дж. Достигнутое равновесное состояние соответствует предварительному натяжению лент в реальной конструкции и фиксируется в качестве начальных условий для основного эксперимента.

Этап 3. Проведение основного вычислительного эксперимента. После завершения подготовительных процедур и фиксации лент в рабочем положении в зону захвата между лентами вводилась мультисферическая модель саженца, предварительно ориентированная под заданным углом относительно направления движения. Ведущим роликам задавалась постоянная угловая скорость ω , обеспечивающая требуемую линейную скорость движения лент $v = \omega R$ (где R — радиус ведущего ролика). Интегрирование системы уравнений движения (1) выполнялось численным методом Рунге-Кутты второго порядка с фиксированным шагом по времени $\Delta t = 10^{-5}$ с, величина которого выбиралась из условия устойчивости численного решения Куранта–Фридрихса–Леви (CFL), обеспечивающего корректное разрешение динамических контактных взаимодействий без накопления численной погрешности.

Этап 4. Регистрация и первичная обработка экспериментальных данных. В процессе моделирования на каждом шаге интегрирования для каждого элемента, входящего в состав мультисферической модели саженца, производилась регистрация векторов сил взаимодействия с элементами лент. Путем суммирования поперечных (удерживающих) компонент этих сил относительно продольной оси саженца рассчитывалась текущая интегральная сила сжатия $F_c(t)$, являющаяся ключевым анализируемым параметром в данном исследовании. Дополнительно фиксировались координаты центра масс саженца $x_c(t), y_c(t), z_c(t)$, что позволяло впоследствии осуществить переход к пространственному представлению $F_c(x_c)$. Для обеспечения статистической достоверности и оценки воспроизводимости результатов каждый сценарий моделирования воспроизводился в трех независимых повторностях с последующим осреднением полученных данных и расчетом стандартных отклонений для всех регистрируемых величин.

Разработанная поэтапная методология подготовки и проведения вычислительного эксперимента обеспечивает воспроизводимость результатов и минимизирует влияние начальных условий, не соответствующих реальному технологическому процессу, на конечные количественные характеристики силового взаимодействия в системе «лента–саженец».

2.4. Программная реализация и параметры

Для проведения численных экспериментов разработан специализированный программный комплекс на языке Object Pascal. Интерактивная среда программы (рис. 6) обеспечивает визуализацию процесса транспортировки саженца, задание контролируемых параметров модели (коэффициенты жесткости, вязкости и трения, скорости движения лент), а также экспорт расчетных данных для последующего анализа. Вычислительные эксперименты выполнялись на рабочей станции с процессором Intel Core i7-12700 (3.6 ГГц) и оперативной памятью 32 ГБ. Для обеспечения статистической достоверности каждый сценарий моделирования воспроизводился в трех повторностях с последующим осреднением полученных значений силовых и кинематических характеристик.

2.5. Верификация модели

Верификация разработанной DEM-модели осуществлялась по нескольким направлениям, позволяющим оценить корректность реализации численного алгоритма и адекватность воспроизведения физических процессов. Прежде всего, выполнялась проверка выполнения закона сохранения энергии: в ходе моделирования контролировалась полная механическая энергия замкнутой системы, включающая кинетическую энергию всех дискретных элементов и потенциальную энергию упругих деформаций связей. Установлено, что относительные

флуктуации полной энергии за полный цикл транспортировки саженца не превышают 0,5 %, что свидетельствует об отсутствии существенной численной диссипации, обусловленной погрешностями интегрирования, и подтверждает корректность реализации алгоритма решения уравнений движения. Вторым направлением верификации выступила качественная валидация кинематических характеристик, в рамках которой проводился визуальный анализ соответствия моделируемого процесса реальным фазам функционирования ленточного механизма (рисунок 4). В ходе вычислительных экспериментов наблюдалось устойчивое воспроизведение всех технологических этапов: начальный захват саженца без проскальзывания, равномерная транспортировка с сохранением ориентации посадочного материала и контролируемое высвобождение в зоне высадки, что свидетельствует о корректном учете геометрических и кинематических параметров системы. Дополнительно осуществлялся контроль отсутствия численных артефактов, характерных для некорректной настройки контактных взаимодействий или ошибок дискретизации. Установлено, что взаимное проникновение элементов не превышает допустимых значений, задаваемых условиями контакта, а скорости движения элементов изменяются плавно, без необусловленных скачков. Отсутствие подобных артефактов подтверждает адекватность выбранных параметров контактной модели и устойчивость численного решения.

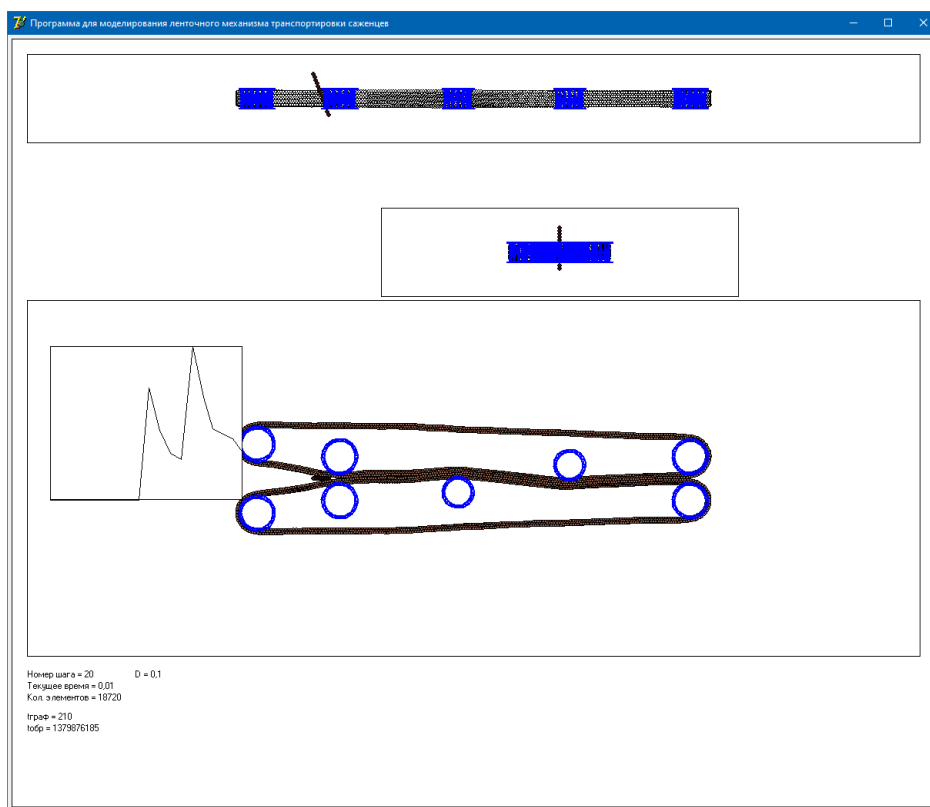


Рисунок 6. Интерфейс разработанного программного комплекса: три проекции модели, график зависимости силы сжатия от времени/положения и панель числовых параметров

Figure 6. Interface of the developed software package: three model projections, a graph of compression force versus time/position, and a panel of numerical parameters
 Источник: Собственные вычисления авторов / Source: Authors' own calculations

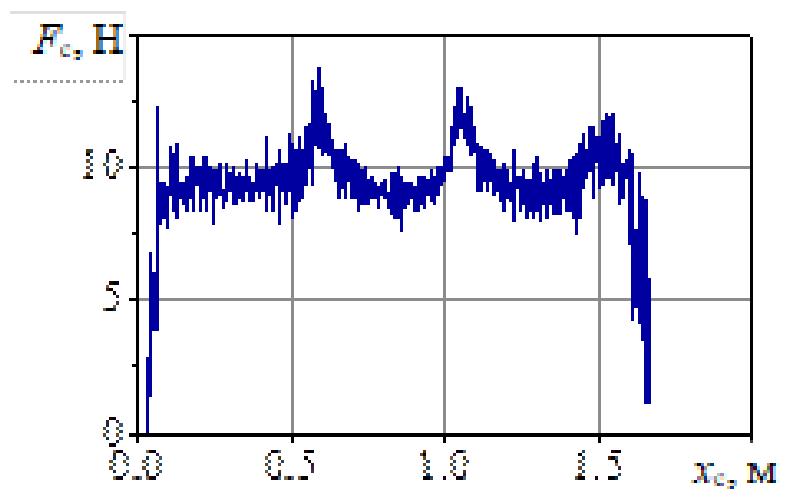


Рисунок 7. Зависимость силы поперечного сжатия саженца F_c от его положения x_c вдоль ленточного механизма. Вертикальными пунктирными линиями отмечено положение центров роликов
 Figure 7. Dependence of the seedling transverse compression force F_c on its position x_c along the belt mechanism. The vertical dashed lines indicate the positions of the roller centers.
 Источник: Собственные вычисления авторов / Source: The authors' own calculations

Результаты

3.1. Верификация и корректность вычислительной модели

Достоверность результатов, полученных методом дискретных элементов, непосредственно обусловлена корректностью реализации численного алгоритма и адекватностью воспроизведения физических процессов. В связи с этим первичная верификация разработанной DEM-модели была проведена по нескольким взаимодополняющим направлениям, включающим анализ выполнения фундаментальных законов сохранения, качественную оценку соответствия моделируемого процесса реальной физической картине и контроль отсутствия численных артефактов.

Ключевым критерием численной устойчивости и корректности интегрирования уравнений движения выступила оценка сохранения полной механической энергии в изолированной системе. В ходе моделирования контролировалась сумма кинетической энергии всех дискретных элементов и потенциальной энергии упругих деформаций связей. Установлено, что относительная флуктуация полной механической энергии за время моделирования одного полного цикла транспортировки саженца не превысила 0,5%. Данный результат свидетельствует об отсутствии существенной численной диссипации, обусловленной погрешностями интегрирования, и подтверждает корректность реализации алгоритма решения уравнений движения Рунге-Кутты второго порядка с выбранным шагом по времени.

Вторым направлением верификации выступила качественная валидация кинематических характеристик моделируемого процесса. Проведен визуальный анализ соответствия фаз движения саженца в модели реальным этапам функционирования ленточного механизма, представленный на рисунке 4. В ходе вычислительных экспериментов наблюдалось устойчивое воспроизведение всех технологических этапов: начальный захват стебля без проскальзывания, равномерная транспортировка с сохранением заданной пространственной ориентации посадочного материала и контролируемое высвобождение в зоне высадки. Такое соответствие подтверждает корректность учета геометрических параметров роликовой системы и кинематических связей, наложенных на элементы лент.

Дополнительно осуществлялся контроль отсутствия численных артефактов, характерных для некорректной настройки контактных взаимодействий или ошибок дискретизации. В процессе моделирования проверялось соблюдение условий непроникновения и непрерывности движения. Установлено, что взаимное перекрытие

элементов (перекрытие, допускаемое контактной моделью) не превышает значений, задаваемых условиями контакта и соответствующих физически допустимой деформации. Скорости движения элементов изменяются плавно, без необусловленных осцилляций и скачков, что свидетельствует об отсутствии жесткости системы, приводящей к численной неустойчивости. Отсутствие подобных нефизических явлений подтверждает адекватность выбранных параметров контактной модели (коэффициентов жесткости, демпфирования и трения) и устойчивость численного решения на всем протяжении модельного времени.

Таким образом, проведенная комплексная верификация подтверждает, что разработанная DEM-модель корректно отражает физику исследуемого процесса, а получаемые с ее помощью количественные характеристики могут служить надежной основой для последующего параметрического анализа и оптимизации конструктивно-режимных параметров ленточного подающего механизма.

3.2. Пространственно-временное распределение силы сжатия саженца

Ключевым результатом работы явилось получение количественной зависимости силы поперечного сжатия саженца F_c от его продольной координаты x_c . График функции $F_c(x_c)$, полученный в результате осреднения данных по трем независимым вычислительным экспериментам, представлен на Рисунке 7.

Ключевым результатом проведенного вычислительного эксперимента явилось установление количественной зависимости силы поперечного сжатия саженца F_c от его продольной координаты x_c вдоль тракта подачи. График функции $F_c(x_c)$, построенный по результатам осреднения данных трех независимых повторностей, представлен на рисунке 7. Статистическая обработка экспериментальных данных включала расчет средних арифметических значений и стандартных отклонений для каждого фиксированного положения саженца, что позволило оценить вариабельность силовых характеристик в идентичных условиях нагружения.

Анализ полученной зависимости позволяет сделать следующие выводы, характеризующие закономерности силового взаимодействия в системе «лента – саженец».

Во-первых, установлено, что сила поперечного сжатия варьирует в диапазоне от 7,5 до 13,5 Н. Среднеинтегральное значение за полный цикл транспортировки составило $F_{c\text{ср.}} = 10,2 \pm 0,3$ Н (здесь и далее указано стандартное отклонение, рассчитанное по трем независимым повторностям

эксперимента). Столь значительный размах колебаний (6 Н) свидетельствует о существенной неравномерности нагружения саженца на различных участках траектории движения.

Во-вторых, выявлена выраженная пространственная периодичность изменения силы сжатия, амплитуда которой модулируется геометрией лентопротяжного механизма, а именно — положением роликов. Методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) подтверждена статистическая значимость ($p < 0,01$) четырех локальных максимумов, координаты которых строго коррелируют с положением роликовых пар:

- Пик 1, достигающий значения 13,5 Н, соответствует зоне начального контакта и захвата саженца ($x_c > \approx 0,1$ м). Повышенное усилие в данной области объясняется необходимостью преодоления инерции покоя и вовлечения саженца в направленное движение.
- Пик 2 (11,8 Н) и Пик 3 (12,1 Н) приходятся на зоны натяжных роликов ($x_c \approx 0,6$ м и $\approx 1,1$ м соответственно). Возрастание силы сжатия в данных областях обусловлено локальным увеличением кривизны лент при их огибании роликов, что приводит к дополнительному обжатию стебля.
- Пик 4 (12,9 Н) наблюдается в зоне освобождения саженца ($x_c \approx 1,5$ м). Данный максимум, вероятно, связан с изменением напряженно-деформированного состояния лент на выходе из контакта с последним роликом и подготовкой к высвобождению посадочного материала.

В-третьих, важным с практической точки зрения является оценка надежности удержания саженца на всем протяжении траектории. Минимальные значения силы сжатия (7,5 Н) зафиксированы на прямолинейных участках между роликами, где отсутствуют дополнительные изгибающие воздействия на ленты. Тот факт, что на всем протяжении траектории движения $F_c > 0$, гарантирует выполнение условия отсутствия макропроскальзывания и свидетельствует о надежном фрикционном удержании саженца на всех этапах транспортировки независимо от положения в механизме.

Таким образом, установленная функциональная зависимость $F_c(x_c)$ не только раскрывает механизм формирования силового воздействия на саженец, демонстрируя его непосредственную связь с конструктивными особенностями роликовой системы, но и создает количественную основу для последующей оптимизации параметров ленточного подающего механизма путем целенаправленного изменения геометрии тракта подачи.

3.3. Анализ напряженно-деформированного состояния лент

В результате анализа контактных взаимодействий в DEM-модели установлено, что эквивалентная деформация материала лент характеризуется локальным распределением.

Максимальные значения деформации ($\epsilon_{\max} = 14\text{--}15\%$) зафиксированы в зонах контакта ленты с натяжными роликами. Данные области соответствуют участкам перегиба ленты на малом радиусе кривизны, что приводит к концентрации изгибных напряжений. Установленная корреляция между зонами максимальной деформации лент и пиковыми значениями силы сжатия саженца F_c (до 13,5 Н на Рисунке 7) позволяет заключить, что деформация лент является прямой причиной возникновения экстремумов силового воздействия на посадочный материал.

На прямолинейных участках транспортировки, свободных от контакта с роликами, деформации не превышают 3–5%, что свидетельствует о работе материала в области упругой линейности. Такой режим деформирования исключает накопление пластических деформаций и гарантирует сохранение эксплуатационных свойств лент в условиях циклического нагружения.

3.4. Оценка биомеханической безопасности процесса

С позиции обеспечения сохранности посадочного материала как живого биологического объекта критическим параметром, лимитирующим допустимый режим работы ленточного подающего механизма, является максимальное значение силы поперечного сжатия саженца $F_{c_{\max}}$. Согласно результатам проведенного вычислительного эксперимента (раздел 3.2), максимальная зарегистрированная величина данного параметра составила $F_{c_{\max}} = 13,5\text{Н}$, что соответствует зоне входного захвата саженца (пик 1 на рисунке 7).

Для оценки степени повреждающего воздействия на растительные ткани необходимо сопоставить полученное значение с известными литературными данными о пределе прочности камбиального слоя и проводящих тканей стебля хвойных саженцев. Камбий, являясь образовательной тканью, обеспечивающей вторичный рост стебля в толщину, наиболее чувствителен к механическим повреждениям, поскольку его разрушение нарушает транспорт питательных веществ и может приводить к гибели растения или существенному снижению приживаемости [5, 6].

Анализ доступных экспериментальных данных, полученных для саженцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с диаметром стебля в корневой шейке 8–12 мм (соответствующих типоразмеру, принятому в данной работе), показывает, что критическое значение силы поперечного сжатия, вызывающее необратимые повреждения камбиальных тканей, находится в интервале 15–18 Н [20]. Данный порог соответствует переходу от упругой деформации клеточных стенок к их пластическому разрушению и образованию магистральных трещин в зоне контакта.

Сопоставление расчетного максимального усилия $F_{c\_max} = 13,5$ Н с указанным порогом повреждения позволяет количественно оценить биомеханическую безопасность исследуемого технологического процесса. Запас прочности k_s , рассчитываемый как отношение порогового значения к фактическому:

$$k_s = \frac{[F]}{F_{c\_max}} \times 100\% = \frac{15}{13,5} \times 100\% \approx 111\% \text{ (по нижней границе)}$$

или в терминах относительного превышения порога:

$$\Delta = \left(1 - \frac{F_{c\_max}}{[F]}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{13,5}{15}\right) \times 100\% \approx 10\% \text{ (по нижней границе)}.$$

Более консервативная оценка с использованием среднего значения порогового интервала (16,5 Н) дает запас прочности:

$$k_s = \frac{16,5}{13,5} \times 100\% \approx 122\%,$$

что соответствует превышению порога повреждения более чем на 20%. Таким образом, можно утверждать, что для исследуемой конфигурации ленточного механизма максимальное силовое воздействие на саженец находится в области безопасных значений с гарантированным запасом не менее 20%.

Полученный результат имеет важное практическое значение, поскольку подтверждает принципиальную возможность реализации щадящего режима транспортировки саженцев в ленточном подающем механизме без риска критического повреждения живых тканей. При этом следует отметить, что даже при достижении абсолютного максимума $F_{c\_max} = 13,5$ Н в зоне захвата, длительность воздействия данного усилия минимальна (доли секунды), что дополнительно снижает вероятность накопления повреждений, поскольку разрушение биологических тканей носит как силовой, так и временной характер.

Вместе с тем, выявленный запас прочности не должен рассматриваться как основание для ужесточения режимов работы без дополнительного анализа. При изменении породного состава посадочного материала, его влажности, сезонного состояния (вегетационный или покоящийся период) механические свойства тканей могут существенно изменяться, что требует либо корректировки модели с использованием соответствующих входных параметров, либо проведения дополнительных натурных экспериментов по уточнению пороговых значений для конкретных условий применения.

3.5. Результаты параметрического анализа влияния скорости

В рамках параметрического анализа выполнена оценка влияния скорости движения лент v на силовое взаимодействие с саженцем. Результаты численных экспериментов для трех значений скорости представлены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние скорости движения лент на силовые характеристики взаимодействия с саженцем

Table 1

Influence of belt speed on the force characteristics of interaction with the seedling

Скорость лент, v (м/с) / Belt speed, v (m/s)	Средняя сила F_{c_cp} (Н) / Average force F_{c_avg} (Н)	Минимальная сила F_{c_min} (Н) / Minimum force F_{c_min} (Н)	Максимальная сила F_{c_max} (Н) / Maximum force F_{c_max} (Н)	Амплитуда колебаний A (Н) / Oscillation amplitude A (Н)
0,5 / 0.5	10,2 ± 0,3 / 10.2 ± 0.3	7,5 ± 0,2 / 7.5 ± 0.2	13,5 ± 0,4 / 13.5 ± 0.4	6,0 ± 0,2 / 6.0 ± 0.2
0,75 / 0.75	10,9 ± 0,4 / 10.9 ± 0.4	7,8 ± 0,3 / 7.8 ± 0.3	14,1 ± 0,5 / 14.1 ± 0.5	6,6 ± 0,3 / 6.6 ± 0.3
1,0 / 1.0	11,0 ± 0,5 / 11.0 ± 0.5	7,7 ± 0,3 / 7.7 ± 0.3	14,4 ± 0,6 / 14.4 ± 0.6	6,9 ± 0,3 / 6.9 ± 0.3

Амплитуда колебаний A определялась как средний размах осцилляций силы сжатия за период установившегося движения, что объясняет отличие ее значений от простой разности максимальной и минимальной сил в отдельных точках. Для оценки используется соотношение:

The oscillation amplitude A was determined as the average range of force fluctuations during the steady-state motion period, which explains the

difference between its values and the simple difference between the maximum and minimum forces at individual points. The following relationship is used for estimation:

$$A = F_{c\_max} - F_{c\_min}, \quad (7)$$

где черта сверху обозначает осреднение по времени или по ансамблю реализаций.

При увеличении скорости движения лент с 0,5 до 1,0 м/с зафиксировано статистически значимое ($p < 0,05$) возрастание среднего значения силы сжатия F_{c_cp} на 7,8% (с 10,2 до 11,0 Н). Максимальная сила F_{c_max} увеличилась на 6,7% (с 13,5 до 14,4 Н). Минимальная сила F_{c_min} остается стабильной на уровне 7,5–7,8 Н во всем исследованном диапазоне скоростей, что гарантирует надежное фрикционное удержание саженца без риска проскальзывания. Наблюдается рост размаха колебаний силы сжатия на 15% (с 6,0 до 6,9 Н), что свидетельствует об усилении динамической составляющей взаимодействия при повышении скорости транспортирования. Выявленная зависимость указывает на существенный вклад инерционных эффектов в процесс контактного взаимодействия и позволяет рассматривать скорость движения лент в качестве одного из ключевых управляемых параметров при оптимизации режимов работы посадочного аппарата.

Обсуждение

Проведенное исследование демонстрирует возможности метода дискретных элементов как эффективного инструмента виртуального прототипирования ленточных механизмов подачи лесопосадочных аппаратов. Полученные результаты позволяют обсудить ряд фундаментальных и прикладных аспектов моделирования гибридных систем «рабочий орган – биологический объект» в контексте современных тенденций цифровизации лесного и сельского хозяйства [1, 2]. Разработанная комплексная модель интегрирует три разнородные подсистемы: дискретную структуру резиновой ленты с упруго-вязкой реакцией, мультисферическую модель саженца с учетом изгибной жесткости и детальную геометрию роликового механизма. Такой подход соответствует современным тенденциям расширения области применения DEM, которые ранее успешно применялись для моделирования взаимодействия рабочих органов с почвой [9, 10, 21], сыпучими материалами в шнековых транспортерах [8] и процессах галтовки [7]. Используемая в настоящем исследовании модифицированная модель контактного взаимодействия базируется на фундаментальных принципах, заложенных в классической работе Cundall и Strack [13], и

развивает их применительно к упруго-вязким материалам.

Важным результатом работы является выявление волнообразного характера распределения силы сжатия $F_{c(x)}$ с выраженными максимумами в зонах расположения роликов. Данная особенность не могла быть обнаружена при использовании упрощенных подходов, в которых растительный материал рассматривается как абсолютно твердое тело. Предложенная мультисферическая модель саженца с 14 элементами, учитывающая силы изгиба между последовательными тройками элементов, развивает методологию, применяемую для калибровки параметров семян различных культур [12, 14–17]. Принципиально важным является то, что использованный подход позволяет воспроизвести деформационное поведение стебля под нагрузкой, что необходимо для корректной оценки биомеханической безопасности процесса. В отличие от моделей семян, где преобладают контактные взаимодействия [11], модель саженца должна учитывать еще и изгибную жесткость стебля, что было реализовано в настоящей работе.

Установленный диапазон варьирования силы сжатия (7,5–13,5 Н) и сравнение пикового значения (13,5 Н) с порогом повреждения тканей хвойных саженцев (15–18 Н) подтверждают выполнение паритетного условия между надежностью удержания и сохранностью материала с запасом прочности не менее 20%. Минимальное значение силы (7,5 Н) на всем протяжении траектории гарантирует отсутствие проскальзывания, что критически важно для обеспечения непрерывности технологического процесса. Полученные результаты согласуются с общей логикой проектирования рабочих органов для работы с растительным материалом, отраженной в работах по совершенствованию выкопочных устройств [5, 6], где также подчеркивается необходимость минимизации повреждающего воздействия на посадочный материал.

Влияние скорости на динамику процесса. Параметрический анализ выявил статистически значимое ($p < 0,05$) увеличение среднего усилия сжатия на 7,8% при росте скорости лент с 0,5 до 1,0 м/с. При этом минимальная сила F_{c_min} оставалась стабильной на уровне 7,5–7,8 Н, что свидетельствует об отсутствии риска потери сцепления во всем исследованном диапазоне. Рост амплитуды колебаний силы на 15% указывает на усиление динамической составляющей взаимодействия при повышении скорости транспортирования. Выявленная зависимость позволяет рассматривать скорость движения лент в качестве одного из ключевых управляемых

параметров при оптимизации режимов работы посадочного аппарата, что перекликается с подходами к оптимизации скоростных режимов рабочих органов в сеялках [3, 4]. Представленная модель ленточного транспортера для саженцев имеет определенное сходство с моделями шнековых конвейеров [8] с точки зрения учета взаимодействия транспортирующего органа с перемещаемым материалом. Однако принципиальное отличие заключается в необходимости учета повреждаемости живых тканей, что сближает данную задачу с проблематикой моделирования семян [11, 12, 16] и других биологических объектов [14]. При этом использованный в работе подход к учету изгибной жесткости стержневой структуры выходит за рамки традиционных контактных моделей и требует дальнейшего развития с привлечением данных о механических свойствах растительных тканей [19, 20].

Ограничения исследования и перспективы развития. Представленная модель, несмотря на высокую детализацию, имеет ряд допущений, которые следует учитывать при интерпретации результатов. Резиновая лента моделировалась как упруго-вязкая среда без учета возможных нелинейных эффектов, характерных для реальных эластомеров при больших деформациях. Мультисферическая модель саженца не учитывает анизотропию механических свойств растительных тканей и их реологические характеристики, что может быть существенно при анализе длительного нагружения. Верификация модели проведена преимущественно на качественном уровне и путем контроля фундаментальных законов сохранения; количественная валидация путем сопоставления с данными натурных экспериментов является предметом дальнейших исследований.

Дальнейшее развитие работы предполагает углубление биомеханической составляющей модели с использованием экспериментальных данных по механическим свойствам тканей саженцев, полученных современными методами исследования материалов [18–20]. Перспективным направлением также является интеграция разработанной подсистемы в комплексную цифровую модель лесопосадочной машины, включающую модели взаимодействия с почвой [9, 10, 21] и процессы ориентирования посадочного материала, что позволит выйти на новый уровень виртуального прототипирования лесохозяйственной техники в контексте задач устойчивого лесовосстановления [1, 2].

Заключение

В результате выполненного исследования разработана и верифицирована детализированная вычислительная модель процесса ленточной подачи саженцев в лесопосадочном аппарате, основанная

на методе дискретных элементов (DEM). Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к моделированию гибридной системы, объединяющей три физически разнородные подсистемы: дискретную структуру резиновой ленты с упруго-вязкой реакцией (модель Кельвина–Фойгта), мультисферическую модель саженца с учетом сопротивления изгибу и детальную полигональную геометрию роликового механизма. Такой подход впервые позволил в единой расчетной среде воспроизвести процессы захвата, транспортировки и освобождения посадочного материала с количественной оценкой силового воздействия на каждом этапе движения.

Проведенная верификация модели подтвердила ее физическую и кинематическую корректность. Установлено, что относительная флуктуация полной механической энергии замкнутой системы за полный цикл транспортировки не превышает 0,5%, что свидетельствует об отсутствии существенной численной диссипации и корректности реализации алгоритма интегрирования уравнений движения. Качественная валидация кинематических характеристик подтвердила воспроизведение всех технологических этапов: начального захвата без проскальзывания, равномерной транспортировки с сохранением ориентации и контролируемого высвобождения саженца.

Ключевым результатом исследования явилось установление пространственно-временного распределения силы поперечного сжатия саженца $F_c(x_c)$. Выявлен волнообразный характер зависимости с выраженными максимумами, строго коррелирующими с положением роликов лентопротяжного механизма. Установлено, что сила сжатия варьирует в диапазоне от 7,5 до 13,5 Н при среднеинтегральном значении $F_{c, \text{ср}} = 10,2 \pm 0,3 \text{ Н}$. Минимальные значения силы, зафиксированные на прямолинейных участках между роликами, гарантируют надежное фрикционное удержание саженца на всем протяжении траектории движения.

Принципиально важным результатом является количественная оценка биомеханической безопасности процесса. Сопоставление максимального расчетного усилия $F_{c, \text{max}} = 13,5 \text{ Н}$ с известными литературными данными о пределе прочности тканей хвойных саженцев (15–18 Н) показало, что работа механизма происходит с запасом прочности не менее 20%. Это подтверждает выполнение паритетного условия между надежностью захвата и сохранностью посадочного материала и свидетельствует о возможности реализации щадящего режима транспортировки в исследуемой конфигурации ленточного подающего механизма.

Параметрический анализ влияния скорости движения лент выявил статистически значимое ($p < 0,05$) увеличение среднего значения силы сжатия на 7,8% при возрастании скорости с 0,5 до 1,0 м/с. Максимальная сила увеличилась на 6,7%, при этом минимальная сила оставалась стабильной на уровне 7,5–7,8 Н, что исключает риск потери сцепления во всем исследованном диапазоне скоростей. Рост амплитуды колебаний силы на 15% указывает на усиление динамической составляющей взаимодействия при повышении скорости транспортирования и позволяет рассматривать скорость движения лент в качестве одного из ключевых управляемых параметров при оптимизации режимов работы посадочного аппарата.

Практическая значимость исследования заключается в создании эффективного инструмента виртуального прототипирования, позволяющего:

- сокращать сроки и стоимость опытно-конструкторских работ за счет замены части

натурных испытаний компьютерными экспериментами;

- проводить многовариантный параметрический анализ для поиска оптимальных конструктивных решений;
- формировать научно обоснованные рекомендации по настройке технологических режимов для различных типоразмеров посадочного материала.

Дальнейшие исследования предполагают углубление биомеханической составляющей модели с учетом анизотропии и реологических свойств стебля, интеграцию разработанной подсистемы в комплексную цифровую модель лесопосадочной машины, а также проведение натурной экспериментальной валидации для уточнения контактных параметров и установления корреляций между силовым воздействием и приживаемостью культур.

Список литературы

1. Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Роль лесов в реализации стратегии низкоуглеродного развития России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 6. – С. 822–836. – DOI 10.31857/S268673972260120X. – EDN JEDQHN.
2. Palander T. Precision Modeling of Fuel Consumption to Select the Most Efficient Logging Method for Cut-to-Length Timber Harvesting. Forests. 2025; 16(2): 294. DOI 10.3390/f16020294. EDN MRCHZA.
3. Wang Q.Y., Peng M., He J., Lu C.Y., Wang C., Tong Z.W. Design and experiment of the ditching device for wheat seeders capable of ditching sloped drainage furrows in rice-wheat rotation areas. Int J Agric & Biol Eng. 2025; 18(1): 154–164.
4. Wang L.Z., Liao Q.X., Li M.L., Shan Y.Y., Li X.R., Zhang Q.S. et al. Drivetype ditching device of the high-speed no-tillage direct seeder for rapeseed. Transactions of CSAE. 2023; 39(19): 15–26. (in Chinese)
5. Коновалов В.И., Коновалов А.Г. Анализ направлений развития машин для выкопки саженцев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 179. – С. 33–54. – DOI 10.21515/1990-4665-179-004. – EDN XABX1Y.
6. Коновалов А.Г., Коновалов В.И. Разработка конструктивно-технологической схемы выкопочной скобы для саженцев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 188. – С. 23–43. – DOI 10.21515/1990-4665-188-004. – EDN FMXEZC.
7. Uhlmann E., Fürstenau J.P., Kuche Y. [et al.] Modeling of the wet immersed tumbling process with the Discrete Element Method (DEM). Procedia CIRP. 2021; 102: 1–6. DOI 10.1016/j.procir.2021.09.001. EDN EJMZCH.
8. Pezo M., Pezo L., Lončar B. [et al.] Granular flow in screw conveyors: A review of experiments and discrete element method (DEM) studies. Powder Technology. 2025; 459: 121040. DOI 10.1016/j.powtec.2025.121040. EDN DVDTTO.
9. Patidar P., Soni P., Jain A., Mahore V. Modelling soil-rotor blade interaction of vertical axis rotary tiller using discrete element method (DEM). Journal of Terramechanics. 2024; 112: 59–68. DOI 10.1016/j.jterra.2024.01.001. EDN KXJWAJ.
10. Мударисов С.Г., Фархутдинов И.М., Гареев И.Ф. Моделирование взаимодействия анкерного сошника с почвой и семенами методом дискретных элементов: анализ тягового сопротивления и агротехнических параметров // Российский электронный научный журнал. – 2025. – № 1(55). – С. 287–295. – DOI 10.31563/2308-9644-2025-55-1-287-295. – EDN JXUHP.
11. Sharaby N.N., Doroshenko A.A., Butovchenko A.V. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM. Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2): 219–231. DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.219-231. EDN NBOEZY.
12. Wang S., Mengqing L., Liu X., Ji J., Chen P. Calibration and analysis of discrete element simulation parameters of Chinese cabbage seeds. PLoS One. 2022; 17(6): e0270415. DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270415>.

13. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*. 1979; 29(1): 47–65.
14. Wang J., Chen L., Tang Y., Chen Z., Wu Q., Han D. Calibration and experiment of discrete element model parameters of *Zanthoxylum bungeanum*. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2023; 9. DOI <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1204659>.
15. Ghodki B.M., Patel M., Namdeo R. et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans. *Comp. Part. Mech.* 2019; 6: 3–10. DOI <https://doi.org/10.1007/s40571-018-0194-7>.
16. Zhang X, Wang H, Wang F, et al. Parameter calibration of discrete element model for alfalfa seeds based on EDEM simulation experiments. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024; 17(3): 33–38. DOI <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241703.8681>.
17. Qing J., Gong X., Cai X. et al. Calibration of discrete element parameters for spinach seeds and optimization of seed-metering device design. *Sci Rep*. 2025. DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-025-34245-3>.
18. Li H., Lu J., Cheng B., Song W. Effects of film overlying soil technology on soil heat balance for mechanized vegetable planting: Experimental study and numerical modelling. *Solar Energy*. 2024; 278: 112786.
19. Wu Q., Miao W., Zhang Y., Gao H., Hui D. Mechanical properties of nanomaterials: A review. *Nanotechnology Reviews*. 2020; 9: 259–273. DOI 10.1515/ntrev-2020-0021.
20. Bradley A.C., Jaksa M.B., Kuo Y.L. Ground response of rolling dynamic compaction—a finite element modelling approach. *Front. Built Environ*. 2024; 9: 1334090. DOI 10.3389/fbuilt.2023.1334090.
21. Saunders C, Ucgul M, Godwin R J. Discrete element method (DEM) simulation to improve performance of a mouldboard skimmer. *Soil and Tillage Research*. 2021; 205: 104764.

References

1. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A., Baibar A.S. Rol' lesov v realizatsii strategii nizkouglerodnogo razvitiya Rossii. [*The role of forests in the implementation of Russia's low-carbon development strategy*]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2022; 86(6): 822–836. DOI 10.31857/S268673972260120X. EDN JEDQHN.
2. Palander T. Precision Modeling of Fuel Consumption to Select the Most Efficient Logging Method for Cut-to-Length Timber Harvesting. *Forests*, 2025; 16(2): 294. DOI 10.3390/f16020294. EDN MRCHZA.
3. Wang Q.Y., Peng M., He J., Lu C.Y., Wang C., Tong Z.W. Design and experiment of the ditching device for wheat seeders capable of ditching sloped drainage furrows in rice-wheat rotation areas. *Int J Agric & Biol Eng*. 2025; 18(1): 154–164.
4. Wang L.Z., Liao Q.X., Li M.L., Shan Y.Y., Li X.R., Zhang Q.S. et al. Drivetype ditching device of the high-speed no-tillage direct seeder for rapeseed. [*Приводная бороздообразовательная фреза высокоскоростной сеялки прямого посева рапса*]. *Transactions of CSAE*, 2023; 39(19): 15–26. (in Chinese)
5. Konovalov V.I., Konovalov A.G. Analiz napravleniy razvitiya mashin dlya vykopki sadentsev. [*Analysis of directions of development of machines for digging seedlings*]. *Politeematcheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2022; 179: 33-54. DOI 10.21515/1990-4665-179-004. EDN XABXIY.
6. Konovalov A.G., Konovalov V.I. Razrabotka konstruktivno-tekhnologicheskoy skhemy vykopchnoy skoby dlya sadentsev. [*Development of a design and technological scheme of a digging bracket for seedlings*]. *Politeematcheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2023; 188: 23-43. DOI 10.21515/1990-4665-188-004. EDN FMXEZC.
7. Uhlmann E., Fürstenau J.P., Kuche Y. et al. Modeling of the wet immersed tumbling process with the Discrete Element Method (DEM). *Procedia CIRP*, 2021; 102: 1–6. DOI 10.1016/j.procir.2021.09.001. EDN EJMZCH.
8. Pezo M., Pezo L., Lončar B. et al. Granular flow in screw conveyors: A review of experiments and discrete element method (DEM) studies. *Powder Technology*, 2025; 459: 121040. DOI 10.1016/j.powtec.2025.121040. EDN DVDTTO.
9. Patidar P., Soni P., Jain A., Mahore V. Modelling soil-rotor blade interaction of vertical axis rotary tiller using discrete element method (DEM). *Journal of Terramechanics*, 2024; 112: 59–68. DOI 10.1016/j.jterra.2024.01.001. EDN KXJWAJ.
10. Mudarisov S.G., Farkhutdinov I.M., Gareev I.F. Modelirovanie vzaimodeystviya ankernogo soshnika s pochvoy i semenami metodom diskretnykh elementov: analiz tyagovogo soprotivleniya i agrotekhnicheskikh parametrov. [*Modeling the interaction of an anchor opener with soil and seeds using the discrete element method: analysis of traction resistance and agrotechnical parameters*]. *Rossiyskiy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2025; 1(55): 287–295. DOI 10.31563/2308-9644-2025-55-1-287-295. EDN JXUHP.

11. Sharaby N.N., Doroshenko A.A., Butovchenko A.V. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM. *Engineering Technologies and Systems*, 2020; 30(2): 219–231. DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.219-231. EDN NBOEZY.
12. Wang S., Li M., Liu X., Ji J., Chen P. Calibration and analysis of discrete element simulation parameters of Chinese cabbage seeds. *PLoS One*, 2022; 17(6): e0270415. DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270415>.
13. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 1979; 29(1): 47–65.
14. Wang J., Chen L., Tang Y., Chen Z., Wu Q., Han D. Calibration and experiment of discrete element model parameters of *Zanthoxylum bungeanum*. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2023; 9: 1204659. DOI <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1204659>.
15. Ghodki B.M., Patel M., Namdeo R. et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans. *Computational Particle Mechanics*, 2019; 6: 3–10. DOI <https://doi.org/10.1007/s40571-018-0194-7>.
16. Zhang X., Wang H., Wang F. et al. Parameter calibration of discrete element model for alfalfa seeds based on EDEM simulation experiments. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2024; 17(3): 33–38. DOI <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241703.8681>.
17. Qing J., Gong X., Cai X. et al. Calibration of discrete element parameters for spinach seeds and optimization of seed-metering device design. *Scientific Reports*, 2025; 15: 34245. DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-025-34245-3>.
18. Li H., Lu J., Cheng B., Song W. Effects of film overlying soil technology on soil heat balance for mechanized vegetable planting: Experimental study and numerical modelling. *Solar Energy*, 2024; 278: 112786. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112786>.
19. Wu Q., Miao W., Zhang Y., Gao H., Hui D. Mechanical properties of nanomaterials: A review. *Nanotechnology Reviews*, 2020; 9(1): 259–273. DOI 10.1515/ntrev-2020-0021.
20. Bradley A.C., Jaksa M.B., Kuo Y.L. Ground response of rolling dynamic compaction—a finite element modelling approach. *Frontiers in Built Environment*, 2024; 9: 1334090. DOI 10.3389/fbuil.2023.1334090.
21. Saunders C., Ucgul M., Godwin R.J. Discrete element method (DEM) simulation to improve performance of a mouldboard skimmer. *Soil and Tillage Research*, 2021; 205: 104764. DOI <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104764>.

Сведения об авторах

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: michael1@yandex.ru.

✉ *Школьных Александр Васильевич* – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3311-5907>, e-mail: alex.hk525@gmail.com

Information about authors

Mikhail V. Drapaluk – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: michael1@yandex.ru.

✉ *Aleksandr V. Shkolnykh* – postgraduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, 8 Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3311-5907>, e-mail: alex.hk525@gmail.com.

✉ Для контактов / Corresponding author



**Экспериментальная верификация теоретической модели
функционирования паровой винтовой машины ПВМ-200
для энергообеспечения лесных терминалов**

Сергей В. Петруша¹, ros-nano@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>

Евгений А. Тихонов¹, tihonov@petrsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Владимир А. Морковин², morkovin-vladimir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Ольга А. Куницкая³, ola.ola07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Павел Н. Перфильев⁴, p.perfilev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

Сергей И. Ревяко⁵, revyako77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

¹ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

⁴ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

⁵ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, 346428, Российская Федерация

В статье представлены результаты комплексных экспериментальных стендовых исследований паровой винтовой машины ПВМ-200, рассматриваемой в качестве ключевого компонента автономной энергоустановки для удалённых лесных терминалов. Создание таких терминалов, предназначенных для глубокой переработки древесины непосредственно в местах её заготовки, является актуальной задачей в контексте освоения ресурсов северных и арктических регионов Российской Федерации, характеризующихся слаборазвитой энергетической и транспортной инфраструктурой. Целью работы являлась верификация теоретической линейной модели зависимости мощности от расхода пара путем установления и анализа реальной зависимости мощности от расхода пара. Стендовые испытания ПВМ-200 проводились в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации, на пяти фиксированных режимах, равномерно охватывающих рабочий диапазон входного давления пара. На основе массива натурных данных методом наименьших квадратов получена уточнённая аппроксимирующая зависимость в виде степенной функции. Статистический анализ согласия новой эмпирической модели с исходной теоретической выполнен с использованием критерия Пирсона (χ^2). Результаты анализа показали статистически значимое расхождение между моделями: теоретические значения мощности не попадают в доверительные интервалы экспериментальных данных. Это свидетельствует о недостаточной точности первоначальной линейной модели, обусловленной неучтёнными механическими и тепловыми потерями. Установленная в ходе испытаний степенная зависимость обладает высокой степенью достоверности с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$ и может быть использована в будущем для разработки усовершенствованной математической модели независимой энергетической системы лесного терминала, что повысит точность расчётов её энергообеспечения и общую эффективность.

Ключевые слова: лесной терминал, биотопливо, паровая винтовая машина, энергетическая устойчивость, статистический анализ, математическая модель, экспериментальная верификация

Финансирование: материалы исследования получены за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Экспериментальная верификация теоретической модели функционирования паровой винтовой машины ПВМ-200 для энергообеспечения лесных терминалов / С. В. Петруша, Е. А. Тихонов, В. А. Морковин, О. А. Куницкая, П. Н. Перфильев, С. И. Ревяко // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 160–173. – Библиогр.: с. 169–172 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/11>.

Поступила 14.04.2025. *Пересмотрена* 21.01.2026. *Принята* 15.03.2026. *Опубликована онлайн* 27.03.2026.

Article

Experimental verification of the theoretical model of operation of the PVM-200 steam screw expander machine for power supply of forest terminals

Sergey V. Petrusha¹, ros-nano@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>

Evgeny A. Tikhonov¹, tikhonov@petrsu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Vladimir A. Morkovin²,  morkovin-vladimir@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

Olga A. Kunitskaya³, ola.ola07@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

Pavel N. Perfiliev⁴, p.perfilev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>

Sergey I. Revyako⁵, revyako77@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

¹ *Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, Russian Federation*

² *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Timiryazev str., 8, Russian Federation*

³ *Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Sergelyakhskoye Highway, 3 km, 3, Russian Federation*

⁴ *Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation*

⁵ *Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov is a branch of the Don State Agrarian University, 111 Pushkinskaya str., Novocherkassk, Russian Federation*

Abstract

The article presents the results of comprehensive experimental bench studies of the SSM-200 steam screw machine, considered as a key component of an autonomous power plant for remote forest terminals. The creation of such terminals, designed for deep processing of wood directly at its production sites, is an urgent task in the context of developing the resources of the northern and Arctic regions of the Russian Federation, characterized by poorly developed energy and transport infrastructure. The purpose of the work is to verify the theoretical linear model of power dependence on steam flow by establishing and analyzing the real power dependence on steam flow. The SSM-200 bench tests were conducted under conditions close to industrial operation, at five fixed modes, uniformly covering the working range of the incoming steam pressure. Based on the natural data array, a refined approximating dependence in the form of a power function was obtained using the least squares method. Statistical analysis of the agreement of the new empirical model with the original theoretical model was performed using Pearson's criterion (χ^2). The analysis results showed a statistically significant discrepancy between the models: theoretical power values do not fall within the confidence intervals of the experimental data. This indicates insufficient accuracy of the initial linear model due to unaccounted for mechanical and thermal losses. The degree dependence established during the tests has a high degree of reliability with a determination coefficient of $R^2 = 0.98$ and can be used in the future to develop an improved mathematical model of an independent energy system of a forest terminal, which will increase the accuracy of its energy supply calculations and overall efficiency.

Keywords: *forest terminal, biofuel, steam screw machine, energy stability, statistical analysis, mathematical model, experimental verification*

Funding: The research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

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

For citation: Petrusha S. V., Tikhonov E. A., Morkovin V. A., Kunitskaya O. A., Perfiliev P. N., Revyako S. I. (2026). Experimental verification of the theoretical model of operation of the PVM-200 steam screw expander machine for power supply of forest terminals. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 160–173 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/11>.

Received 14.04.2025.

Revised 21.01.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

Актуальность исследований в области автономной энергетики на древесных отходах обусловлена необходимостью энергообеспечения удалённых лесозаготовительных терминалов, стремлением к снижению углеродного следа и максимальному использованию местных ресурсов [1-3].

Фундаментальные исследования подтверждают экологическую и операционную выгоду перехода на древесное топливо. Мехренцев и Корж [4] подчёркивают, что использование нормированного древесного топлива (щепа, пеллеты) обеспечивает низкие выбросы CO₂ и повышает энергоэффективность лесопромышленного производства. Ключевыми организационными решениями они видят создание топливно-технологических терминалов, что позволяет оптимизировать логистику и вовлекать в оборот низкосортную древесину.

Экономический анализ, представленный Марченко и Соломиным [5,6], демонстрирует конкурентоспособность газогенераторных электростанций (ГГЭС) на древесном топливе. Их расчёты показывают, что мини-ТЭЦ на щепе становятся эффективнее дизельных электростанций, а при введении платы за выбросы CO₂ могут конкурировать и с установками на угле и газе.

Эти выводы методологически опираются на ряд работ по оценке ресурсов и эффективности возобновляемых источников энергии в России [7-9]. Конкурентоспособность напрямую зависит от оптимизации всей логистической цепочки топливообеспечения, где критически важен выбор техники и минимизация транспортных затрат [10,11].

Исследования в области технологий газификации биомассы для автономных объектов развиваются от концептуального анализа к детальному проектированию. Куницкая и соавт. [12] провели комплексный обзор газогенерирующих систем, сравнив различные типы реакторов (с плотным, псевдоожиженным слоем, с увлечённым потоком) и обосновав выбор установок малой мощности (1–10 МВт) для лесных терминалов. Они отмечают, что стоимость энергии от таких установок может быть в 15 раз ниже, чем при использовании дизельного топлива.

Это направление получило развитие в работах Анисимова и коллектива, которые сфокусировались на создании высокоэффективных гибридных установок мегаваттного класса. В их исследованиях представлена эволюция от имитационного моделирования схемы, сочетающей газовую турбину (ГТУ) на генераторном газе и

турбину органического цикла Ренкина (ОЦР) для утилизации тепла, до детального проектирования мобильной энергоустановки на этой основе. Результаты моделирования показывают, что такая установка может достигать электрического КПД около 30.5% при температуре -10°C, однако её эффективность значительно падает в тёплом климате, что требует адаптации режимов работы. Проектное решение характеризуется интегрированной системой подготовки топлива (сушка щепой уходящими газами) и оптимизированными параметрами, что делает его пригодным для энергоснабжения крупных перерабатывающих комплексов [13-15].

Для малых и удалённых терминалов с потребностями в сотни киловатт более перспективными могут быть менее сложные и капиталоемкие решения. В качестве таковых рассматриваются энергоустановки на основе паровых винтовых машин (ПВМ), таких как модель ПВМ-200, работающих в простом паровом цикле [14].

Современные исследования в области ПВМ развиваются в направлении создания цифровых двойников и уточнения физических моделей с учётом реальных процессов [15, 16]. Применение CFD-моделирования позволяет проводить трёхмерный анализ течения с учётом фазового перехода [17]. В России разработали методику расчёта характеристик ПВМ для лесопромышленного комплекса. Несмотря на обилие теоретических и лабораторных исследований, в литературе отмечен существенный пробел: отсутствуют комплексные работы по экспериментальной верификации моделей конкретных промышленных образцов (например, ПВМ-200) в составе реальных энергокомплексов лесных терминалов. Ценными предшественниками таких исследований являются работы по экспериментальной идентификации механизмов потерь [19], проверке цифровых двойников [20] и, в особенности, результаты опытно-промышленной эксплуатации энергокомплекса на базе ПВМ-150 на лесозаготовительном предприятии [21-22]. Восполнение данного пробела путём натурной верификации моделей является важной научно-практической задачей для надёжного внедрения подобных локальных энергоисточников.

Анализ литературы выявляет последовательную эволюцию исследований в области автономной биоэнергетики для лесного комплекса: от обоснования экономической и экологической целесообразности перехода на древесное топливо к глубокому технологическому анализу и сравнительной оценке различных методов преобразования энергии. Современный этап

характеризуется активным применением методов математического и имитационного моделирования для проектирования сложных гибридных систем (ГТУ+ОЦР) и совершенствования моделей более простых агрегатов, таких как паровые винтовые машины. Ключевой тенденцией является движение от теоретических расчётов и стендовых испытаний к созданию инженерных решений, адаптированных к суровым условиям эксплуатации и направленных на практическую реализацию.

Несмотря на значительный научный задел в области моделирования винтовых машин и наличие отдельных примеров их применения, выявлен чёткий пробел: отсутствие верифицированной на натурных данных теоретической модели промышленного образца ПВМ-200, работающего в реальных условиях лесозаготовительного комплекса.

Таким образом, целью настоящей работы является восполнение данного пробела путём проведения натурной экспериментальной верификации уточнённой теоретической модели ПВМ-200, интегрированной в реальный технологический процесс энергообеспечения лесозаготовительного терминала. Решение этой задачи позволит создать достоверный инструмент для проектирования, оптимизации и прогнозирования работы подобных локальных энергоисточников, снизив риски их внедрения.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась паросиловая микротурбинная установка (ПВМ) ПВМ-200, рассматриваемая в качестве базового источника энергоснабжения автономных лесных терминалов. Целью экспериментальной работы была оценка энергетических характеристик установки, количественный анализ влияния параметров парового цикла на её мощность и верификация адекватности существующей теоретической модели на основе сравнения с массивом натурных данных.

Испытания проводились в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации, на производственной площадке ООО «Промышленные компоненты КАМАЗ» (г. Набережные Челны). Температура окружающего воздуха составляла 20–25°C, атмосферное давление — нормальное. Программа испытаний включала три этапа: предварительную проверку оборудования, испытания без нагрузки (обкатка) и испытания под нагрузкой. Для построения нагрузочной характеристики были установлены пять фиксированных режимов, равномерно охватывающих рабочий диапазон входного давления пара. Продолжительность работы на каждом режиме составляла 5 часов для обеспечения выхода на

установившийся тепловой режим. Параметры режимов испытаний представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Режимы испытаний ПВМ-200

Table 1

SSM-200 Test Modes

№ режима / Mode No.	Давление пара на входе, $P_{вх}$ (МПа абс.) / Steam inlet pressure, P_{in} (MPa abs.)	Температура пара на входе, $t_{вх}$ (°C) / Steam inlet temperature, t_{in} (°C)	Давление пара на выходе, $P_{вых}$ (МПа абс.) / Steam outlet pressure, P_{out} (MPa abs.)	Частота вращения, n (об/мин) / Rotation speed, n (rpm)	Продолжительность, τ (ч) / Duration, τ (h)
1	0.216	121	0.15	3000	5
2	0.35	134	0.15	3000	5
3	0.43	125	0.15	3000	5
4	0.54	152	0.15	3000	5
5	0.60	158	0.15	3000	5
Итого / Total					25

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Для контроля и регистрации параметров использовался комплекс поверенных средств измерений. Измерение давления проводилось с помощью манометров класса точности 1.0, температуры — термометрами типа К (ТХА) с погрешностью $\pm 1.5^\circ\text{C}$. Частота вращения вала контролировалась цифровым тахометром класса 0.5, а уровень вибрации и шума — шумомером-виброметром ШИ-01В класса 1. Синхронная запись значений с интервалом 5 секунд обеспечивалась автоматизированной системой сбора данных. В Таблице 2 представлены основные измеряемые параметры и средства контроля.

Таблица 2
Измеряемые параметры и средства
контроля

Table 2
Measured Parameters and Control Means

Назначение параметра / Parameter Purpose	Средство измерений / Measuring Instrument	Класс точности / погрешность / Accuracy Class / Error
Давление пара / Steam pressure	Манометр / Pressure Gauge	1.0
Температура пара / Steam temperature	Термопара типа К (ТХА) / Type К Thermocouple (ТХА)	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
Частота вращения вала / Shaft rotation speed	Цифровой тахометр / Digital Tachometer	0.5
Уровень вибрации и шума / Vibration and noise level	Шумомер-виброметр ШИ-01В / Shi-01B Sound Level Meter and Vibrometer	1

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Обработка экспериментальных данных включала методы статистического анализа и регрессионного моделирования. Для каждого режима были усреднены результаты пяти независимых измерений выходной мощности. Зависимость мощности от входного давления получена методом наименьших квадратов путём аппроксимации степенной функцией. Качество аппроксимации оценивалось с помощью коэффициента детерминации (R^2). Верификация теоретической модели проводилась путём статистического сравнения экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями. Для этого были рассчитаны стандартное отклонение, 95% доверительные интервалы и применён критерий согласия Пирсона (χ^2).

Результаты

В результате испытаний получены массивы данных для пяти режимов. Значения мощности для каждого режима получены в результате пяти

независимых измерений. На основе полученных данных были усреднены значения мощности для каждого из режимов, приведённые в таблице 3.

Методом наименьших квадратов получена степенная функция

$$N_{\text{эсп}} = 386 \cdot P_{\text{вх}}^{1,69}. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации R^2 для данной зависимости составил 0,98, что свидетельствует о высоком качестве аппроксимации. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой в диапазоне мощностей от 10 до 200 кВт составило $\sigma=3.98$ кВт с относительной погрешностью 2%.

Теоретическая линейная зависимость расхода пара от мощности $G = f(N_{\text{теор}})$ (см. рисунок 2), выглядит как:

$$G = 0,0167 \cdot N_{\text{теор}} - 0,667. \quad (2)$$

Преобразуем десятичные дроби в обыкновенные и выразим значение $N_{\text{теор}}$:

$$N_{\text{теор}} = 60 \cdot G - 40. \quad (3)$$

Если принять, что расход пара G изменяется в зависимости от давления на входе $P_{\text{вх}}$, теоретическую зависимость $N_{\text{теор}}(G)$ можно привести к виду $N_{\text{эсп}}(G)$. Для сравнения теоретических и экспериментальных данных необходимо выразить расход пара G через давление на входе $P_{\text{вх}}$.

При условии пропорциональной связи расход пара можно представить выражением:

$$G = \left(\frac{N_{\text{эсп}}}{386 \cdot k^{1,69}} \right)^{0,59}, \quad (4)$$

где коэффициент k подбирается из условия соответствия расхода $G=4$ т/ч мощности $N = 200$ кВт, что даёт $k=0,049$.

Следовательно, аппроксимированное значение мощности $N_{\text{аппр}}$ описывается зависимостью:

$$N_{\text{аппр}} = 18,91 \cdot G^{1,69}. \quad (5)$$

Для оценки точности и адекватности полученной зависимости рассчитаем аппроксимированные значения мощности $N_{\text{аппр}}$ и сравним их со средними экспериментальными значениями $N_{\text{эсп}}$, чтобы определить среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (N_{\text{эсп},i} - N_{\text{аппр},i})^2}{n-1}}. \quad (6)$$

В диапазоне мощностей от 10 до 200 кВт $\sigma=0,014$, что указывает на пренебрежимо малую относительную погрешность.

На основании полученных результатов построен график, представленный на рисунке 3, сопоставляющий теоретическую формула (3) и аппроксимированную формула (5) зависимости

мощности ПВМ-200 от расхода пара, определяемого по формуле 4.

Сравнение экспериментальных и теоретических кривых выявило схожую тенденцию роста, однако количественные значения различаются. Полученная в ходе испытаний аппроксимационная зависимость проходит ниже теоретической кривой. Это расхождение обусловлено факторами, не учтенными в теоретической модели: механическими потерями, неравномерностью подачи пара и тепловыми потерями.

Для количественной проверки согласия теоретической модели с новой зависимостью использован критерий Пирсона. Результаты расчетов, включая аппроксимационные и теоретические значения мощности, границы доверительных интервалов и вклад каждого режима в критерий χ^2 сведены в таблицу 5.

Рассчитанное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}}=24,73$. При уровне значимости 0,95 и числе степеней свободы 5 табличное значение $\chi^2_{\text{табл}}=9,49$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$, гипотеза о согласии теоретических и полученных в ходе опыта результатов признана несостоятельной, так как расхождения статистически значимы.

Исходя из полученных значений, построен график с доверительными интервалами, представленный на рисунке 1.

Ключевым выводом является статистически значимое расхождение теоретических и экспериментальных данных: значения, предсказанные моделью, выходят за пределы доверительных интервалов измерений. Это служит прямым статистическим доказательством недостаточной адекватности теоретической модели.

Обсуждение

Проведённые натурные испытания паросиловой микротурбинной установки ПВМ-200 позволили получить экспериментальные данные, анализ которых даёт основание для оценки адекватности существующей теоретической модели и уточнения её параметров.

Ключевым результатом работы является установление эмпирической зависимости выходной мощности от давления пара на входе в виде степенной функции с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.98$). Данный факт свидетельствует о сильной нелинейной связи между этими параметрами в исследованном диапазоне.

Полученная зависимость принципиально отличается от линейной теоретической модели, связывающей мощность с расходом пара. Это расхождение является статистически значимым, что подтверждается результатами проверки по критерию Пирсона ($\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$).

Основными факторами, обуславливающими выявленное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми, могут являться:

1. Механические потери, не учтённые в идеализированной модели. К ним относятся потери на трение в подшипниках, зубчатых зацеплениях редуктора и на уплотнениях, которые возрастают с увеличением частоты вращения и нагрузки, потребляя часть индикаторной мощности.
2. Тепловые потери в окружающую среду. Теоретическая модель предполагает адиабатическое расширение, в то время как реальный процесс сопровождается теплообменом с элементами конструкции и окружающим воздухом, что снижает доступную для преобразования энергию пара.
3. Гидравлические потери и неидеальность потока. В реальной установке имеют место потери давления в трактах, парораспределительном устройстве и проточной части турбины, а также отклонения реального процесса расширения от изоэнтропного, что снижает эффективный перепад энтальпий.
4. Погрешность косвенного определения расхода пара через давление на входе. Принятая в теоретическом сопоставлении пропорциональная связь $G = f(P_{\text{вх}})$ может не полностью отражать реальные характеристики регулирующей арматуры и изменение параметров пара на входе.

Обнаруженное систематическое занижение экспериментальных значений мощности относительно теоретических предсказаний (экспериментальная кривая на рисунке 3 проходит ниже теоретической) указывает на то, что теоретическая модель, основанная на термодинамическом расчёте идеального цикла, требует корректировки с введением интегрального коэффициента потерь, зависящего от режима работы.

Таблица 3

Параметры ПВМ-200 при испытаниях под нагрузкой

Table 3

SSM-200 parameters during load testing

Назначение измеряемых параметров Purpose of the measured parameters	Ед. изм. Units of measurement	Режимы испытаний Test modes				
		1	2	3	4	5
Давление пара в коллекторе пара Steam pressure in the steam manifold	МПа MPa	0,9	0,9	0,9	0,89	0,87
Давление пара на входе в расширитель Steam pressure at the expander inlet	МПа MPa	0,125	0,321	0,461	0,571	0,706
Температура пара на входе в расширитель Steam temperature at the expander inlet	°C	122,8	139,6	151,6	161,6	167,7
Давление пара на выходе из расширителя Steam pressure at the expander outlet	МПа MPa	0,046	0,047	0,048	0,051	0,050
Температура пара на выходе из расширителя Steam temperature at the expander outlet	°C	110,9	112,5	112,9	111,5	111,3
Давление масла в коллекторе Oil pressure in the manifold	кг/см ² kg/sm ²	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Температура масла в коллекторе Oil temperature in the manifold	°C	17,1	17,1	17,1	24,5	24,6
Температура масла на сливе шестерни связи Oil temperature at the coupling gear drain	°C	32,3	34,3	35,4	36,6	35,4
Температура масла на сливе подшипников Oil temperature at the bearing drain	°C	33,6	35,6	36,3	37,7	41,6
Температура масла на сливе шестерни редуктора Oil temperature at the gearbox drain	°C	25,7	26,5	32,5	36,2	36,6
Температура воды на входе в теплообменник Water temperature at the heat exchanger inlet	°C	18,0	12,0	12,0	12,0	12,9
Температура воды на выходе из теплообменника Water temperature at the heat exchanger outlet	°C	18,7	18,7	18,7	21,7	20,5
Расход охлаждающей воды Cooling water flow rate	т/ч ton/h	0	4,1	16,1	18,0	16,4
Уровень вибрации на шестернях связи Vibration level at the coupling gear	мм/с mm/c	1,7	2,5	3,2	5,3	6,0
Уровень вибрации на шестернях редуктора Vibration level at the gearbox gear	мм/с mm/c	1,1	1,3	1,7	2,2	2,3
Уровень шума Noise level	дБ dB	73,7	74,8	74,8	74,9	75,2
Частота вращения выходного вала расширителя Expander output shaft speed	об/мин rpm	3003	3005	3009	3012	3015
Мощность генератора Generator power	кВт kW	11,2	60,3	105,7	156,7	210,8
		10,9	65,4	107,8	149,3	198,7

Технологии. Машины и оборудование

		11,0	63,3	106,3	155,5	201,7
		10,7	60,7	100,9	147,1	196,6
		10,9	62,7	104,5	148,9	194,8

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 4

Эмпирическая зависимость $N_{\text{эксп}} = f(P_{\text{вх}})$

Table 4

Empirical dependence $N_{\text{эксп}} = f(P_{\text{вх}})$

Давление пара на входе $P_{\text{вх}}$, МПа abs Steam inlet pressure $P_{\text{вх}}$, МПа abs	0,125	0,321	0,461	0,571	0,706
Средняя мощность $N_{\text{эксп}}$, кВт Average power $N_{\text{эксп}}$, kW	11	62	105	152	201

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

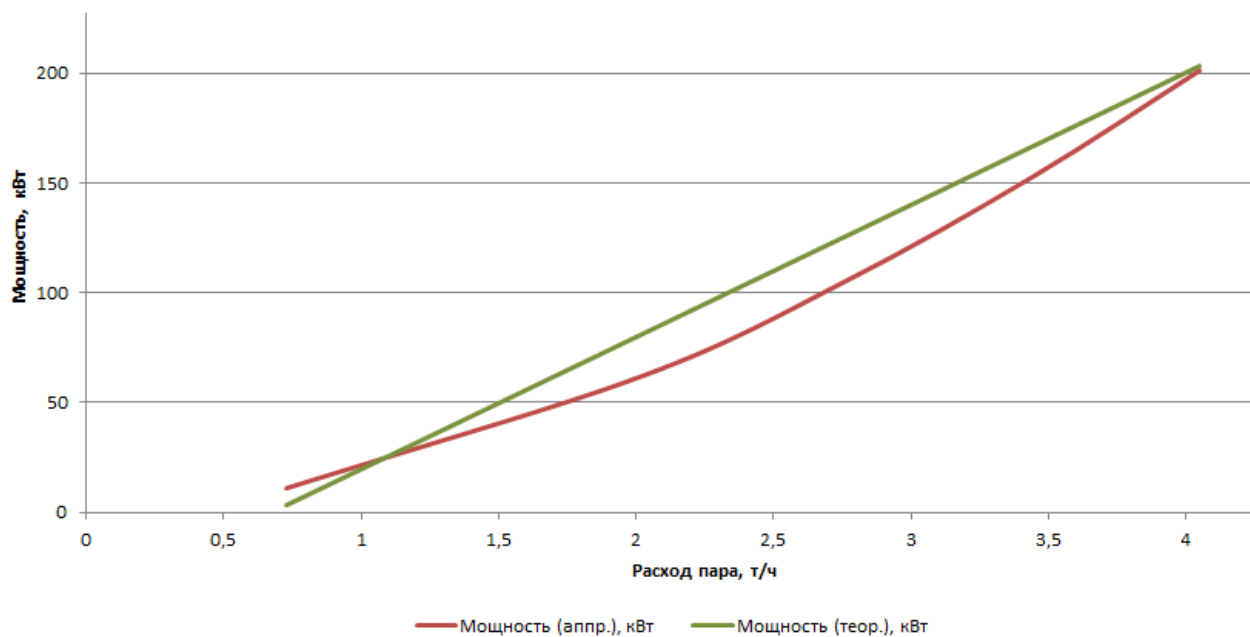


Рисунок 2. Зависимости мощности ПБМ-200

Figure 2. SSM-200 power dependence schedule

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Проверка по критерию Пирсона

Table 5

Pearson's test

Давление пара на входе $P_{вх}$, МПа абс Steam inlet pressure R_{vx} , MPa abs	Мощность $N_{эксп}$, кВт Power N_{exp} , kW	Мощность $N_{теор}$, кВт Power N_c , kW	ДИ _{min} $C_{i_{min}}$	ДИ _{max} $C_{i_{max}}$	Стандартное отклонение s_i Standard deviation s_i	Значение критерия χ^2 The value of the χ^2 criterion
0,125	11	3,54	10,77	11,23	0,18	15,69
0,321	62	81,14	59,43	64,57	2,07	4,52
0,461	105	125,45	101,77	108,23	2,60	3,33
0,571	152	165,93	146,66	157,34	4,30	1,17
0,706	201	202,96	192,19	208,81	6,29	0,02
Итого:						24,73

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

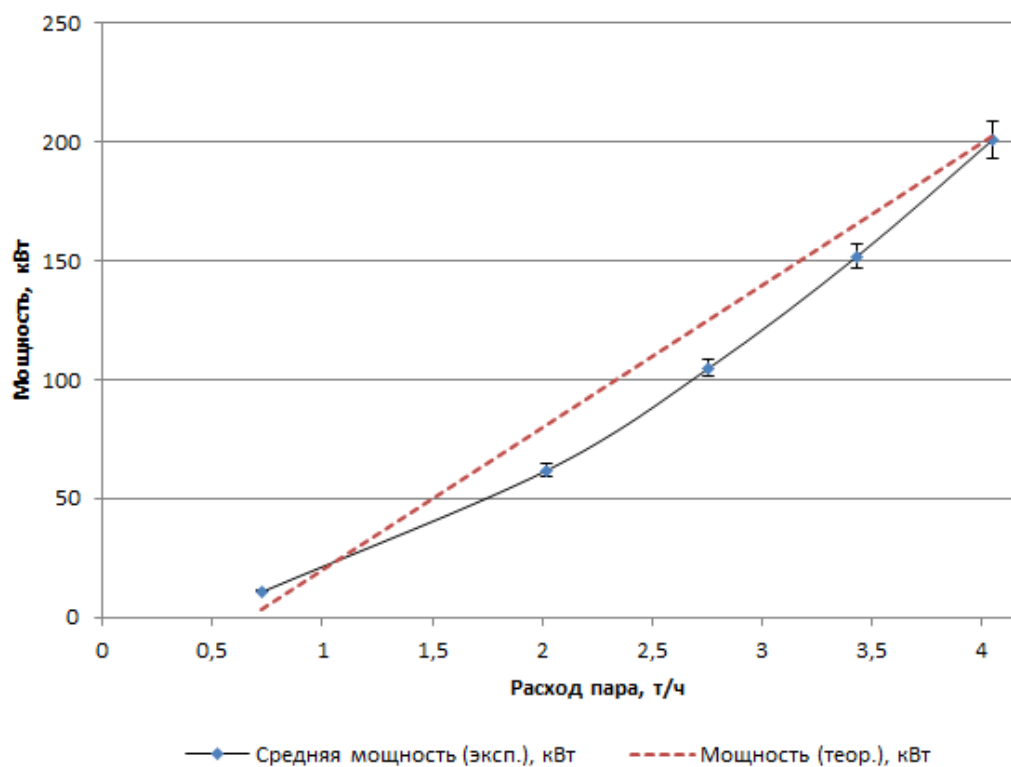


Рисунок 3. График проверки по критерию Пирсона

Figure 3. Pearson's test schedule

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

С практической точки зрения, полученная степенная эмпирическая зависимость $N = 386 \cdot P_{вх}^{1,69}$ представляет большую ценность для инженерных расчётов при проектировании энергокомплексов на базе ПВМ-200, так как позволяет с высокой точностью прогнозировать её выходную мощность по легко измеряемому параметру — давлению в паровой магистрали. Низкое среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 3.98$ кВт) подтверждает пригодность данной модели для практического применения.

Таким образом, результаты исследования подтверждают необходимость использования для целей проектирования и оптимизации режимов работы уточнённых моделей, основанных на экспериментальных данных или включающих в теоретические расчёты поправочные коэффициенты, учитывающие механические, гидравлические и тепловые потери. Дальнейшие исследования могут быть направлены на декомпозицию общих потерь и построение более детальной физически обоснованной модели, параметры которой идентифицируются по результатам испытаний.

Заключение

На основании данных стендовых испытаний, выполненных на базе ООО «Промышленные компоненты КАМАЗ», была установлена экспериментальная зависимость мощности паровой винтовой машины ПВМ-200 от расхода поступающего пара. Аппроксимация данных испытаний позволила получить степенную функцию $N_{\text{аппр}} = 18,91 \cdot G^{1,69}$.

Данная зависимость была сопоставлена с теоретической моделью, представленной в виде $N_{\text{теор}} = 60 \cdot G - 40$. Статистический анализ сравнения выявил существенное расхождение между кривыми; теоретические значения не попадают в доверительные интервалы экспериментальных данных, что указывает на недостаточную точность исходной модели.

Установленная эмпирическая зависимость мощности от расхода пара будет использована для разработки усовершенствованной математической модели функционирования лесного терминала, что позволит повысить точность расчётов за счёт учёта реальных эксплуатационных параметров. Проведённое исследование, основанное на методологии натурных испытаний и статистического анализа, позволило осуществить верификацию теоретической модели работы паросиловой микротурбинной установки ПВМ-200 и получить количественную оценку её энергетических характеристик.

Установлено, что зависимость выходной мощности от давления пара на входе адекватно описывается нелинейной степенной функцией с высоким коэффициентом детерминации, что свидетельствует о её надёжности для прогнозных инженерных расчётов.

Сравнительный анализ выявил статистически значимое систематическое расхождение между экспериментальными данными и предсказаниями линейной теоретической модели, базирующейся на термодинамике идеального цикла. Это расхождение обусловлено комплексом неучтённых эксплуатационных потерь — механических, гидравлических и тепловых, — что указывает на ограниченную применимость исходной модели для задач точного проектирования.

Таким образом, работа подтверждает необходимость использования для проектирования и оптимизации интегрированных энергосистем уточнённых моделей, параметризованных по данным натурных испытаний или дополненных корректирующими коэффициентами, учитывающими реальные потери. Полученные результаты и применённая методика формируют основу для дальнейших исследований, направленных на декомпозицию потерь и разработку детализированных физико-математических моделей распределённых энергоустановок.

Список литературы

1. Maganov I., Tihonov E., Petrusha S., Trushevskiy P., Morkovin V., Kunitskaya O. Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Forestry Engineering Journal*, 2024; 14: 5-22. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>.
2. Vasković S., Tanić Lj., Gvero P., Husika A. Operational Analysis and Optimization of a District Heating Plant Using Wood Chips. *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, 2025; 3: 254-265. – DOI: <https://doi.org/10.56578/peet030403>.
3. Derezińska A., Redosz K. A Model-Driven Engineering Approach to the Evaluation of a Remote Controller of a Movement Assistant System. In: Gruca A., Brachman A., Kozielski S., Czachórski T. (eds.). *Man–Machine Interactions 4*. Cham: Springer, 2016: 69-78. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; 391). – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23437-3_7.

4. Мехренцев А.В., Корж М.А. Теплогенерация на основе древесного топлива как база для повышения энергоэффективности в лесопромышленном производстве. Леса России и хозяйство в них. – 2019. – № 3 (70). – С. 78–86.
5. Марченко О.В., Соломин С.В. Сравнительная стоимостная оценка энергетического использования древесных отходов и традиционных топлив для производства электроэнергии и тепла. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 34–42.
6. Марченко О., Соломин С., Козлов А. Возможности использования древесных отходов в энергетике России. Экология и промышленность России, 2019; 23 (6): 17–21. – DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-6-17-21>.
7. Козырь Д.А., Губин В.Е., Янковский С.А. Оценка экологической эффективности ресурсосберегающих проектов топливно-энергетического комплекса. Энергетические установки и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 3. – С. 86–93.
8. Водождокова З.А., Курмалиева З.Х., Гишева С.Ш. Развитие биоэкономики в рамках реализации стратегических кластерных инициатив в лесопромышленном комплексе региона. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. – 2020. – № 3(265). – С. 15–22.
9. Guzović Z., Duic N., Piacentino A., Markovska N., Mathiesen B.V., Lund H. Recent advances in methods, policies and technologies at sustainable energy systems development. Energy, 2022; 245: 123276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123276>.
10. Ali Omidkar, Razieh Es’haghian, Hua Song. Predicting biomass transportation costs: A machine learning approach for enhanced biofuel competitiveness. Cleaner Logistics and Supply Chain, 2025; 16: 100252. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100252>.
11. Cheng W., Zhang Y., Wang P. Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants. Sustainable Cities and Society, 2020; 55: 102040. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102040>.
12. Куницкая О.А., Помогуев А.В., Калита Е.Г., Швецова В.В., Тихонов Е.А. Анализ газогенерирующих систем для автономного энергоснабжения лесных терминалов. Resources and Technology. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 53–76.
13. Анисимов П.Н., Медяков А.А. Разработка и численное моделирование энергоустановки с газовой турбиной открытого цикла и паровой турбиной с органическим рабочим телом. Научный журнал. – 2022. – С. 3–6.
14. Анисимов П.Н., Ширнин Ю.А., Петухов И.В., и др. Разработка мобильной энергоустановки на древесном топливе для автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 248. – С. 206–219. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.206-219>.
15. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трех циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 44–55. – DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/274>.
16. Сукманова Т.В., Белов Н.С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. – 2025. – № 1. – С. 40–57. – DOI: <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2025-1-3>.
17. El Azzaoui A., Kim T.W., Loia V., Park J.H. Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city. In: Park J., Loia V., Yi G., Sung Y. (eds.). Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 107–113. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9309-3_15.
18. Giuffrida N., Fajardo-Calderin J., Masegosa A.D., Werner F., Steudter M., Pilla F. Optimization and Machine Learning Applied to Last-Mile Logistics: A Review. Sustainability, 2022; 14 (9): 1–16.

19. Dzuban A.V., Galstyan A.A., Kovalenko N.A., Uspenskaya I.A. Thermodynamic Modeling of Multicomponent Rare Earth Nitrates Aqueous Systems. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2021; 95 (12): 2394-2404. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024421120074>.
20. Schweizer F., Fürst M., Wachtmeister G. Modeling and Validation of a Two-Phase Flow Valve for Expanders in Waste Heat Recovery. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2021; 13 (3): 031022. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048675>.
21. Zhao Z., Zhang J., Wang G., Yuan H., Tian Y. Research and clearance analysis on of steam twin-screw expander employed in industrial waste heat recovery. Energy, 2024; 312: 133439. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133439>.
22. Lee S., Kim D., Ha H., Kim M.S. Pressure energy recovery of LNG integrated with multi-stage feedwater fuel preheaters in a combined cycle power plant. Energy, 2023; 285: 128694. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128694>.

References

1. Maganov I., Tihonov E., Petrusha S., Trushevskiy P., Morkovin V., Kunitskaya O. Study of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. Forestry Engineering Journal, 2024; 14: 5-22. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/1>.
2. Vasković S., Tanić Lj., Gvero P., Husika A. Operational Analysis and Optimization of a District Heating Plant Using Wood Chips. Power Engineering and Engineering Thermophysics, 2025; 3: 254-265. – DOI: <https://doi.org/10.56578/peet030403>.
3. Derezińska A., Redosz K. A Model-Driven Engineering Approach to the Evaluation of a Remote Controller of a Movement Assistant System. In: Gruca A., Brachman A., Kozielski S., Czachórski T. (eds.). Man–Machine Interactions 4. Cham: Springer, 2016: 69-78. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; 391). – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23437-3_7.
4. Mekhrentsev A.V., Korzh M.A. Teplogeneratsiya na osnove drevesnogo topliva kak baza dlya povysheniya energoeffektivnosti v lesopromyshlennom proizvodstve. [Heat generation based on wood fuel as a basis for improving energy efficiency in timber industry]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh = [Forests of Russia and their Management], 2019; 3(70): 78-86.
5. Marchenko O.V., Solomin S.V. Sravnitel'naya stoimostnaya otsenka energeticheskogo ispol'zovaniya drevesnykh otkhodov i traditsionnykh topliv dlya proizvodstva elektroenergii i tepla. [Comparative cost assessment of energy use of wood waste and traditional fuels for electricity and heat generation]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2021; 332(7): 34-42.
6. Marchenko O., Solomin S., Kozlov A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya drevesnykh otkhodov v energetike Rossii. [Potential for using wood waste in the Russian energy sector]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii = [Ecology and Industry of Russia], 2019; 23(6): 7-21. – DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-6-17-21>.
7. Kozyr' D.A., Gubin V.E., Yankovskiy S.A. Otsenka ekologicheskoy effektivnosti resursosberegayushchikh proektov toplivno-energeticheskogo kompleksa. [Assessment of environmental efficiency of resource-saving projects in the fuel and energy sector]. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii = [Power Plants and Technologies], 2023; 9(3): 86-93.
8. Vodozhdokova Z.A., Kurmalieva Z.Kh., Gisheva S.Sh. Razvitie bioekonomiki v ramkakh realizatsii strategicheskikh klasternykh initsiativ v lesopromyshlennom komplekse regiona. [Development of bioeconomy within the framework of implementing strategic cluster initiatives in the regional forestry sector]. Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 5: Ekonomika = [Bulletin of the Adyghe State University. Series 5: Economics], 2020; 3(265): 15-22.
9. Guzović Z., Duic N., Piacentino A., Markovska N., Mathiesen B.V., Lund H. Recent advances in methods, policies and technologies at sustainable energy systems development. Energy, 2022; 245: 123276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123276>.

10. Omidkar A., Es'haghian R., Song H. Predicting biomass transportation costs: A machine learning approach for enhanced biofuel competitiveness. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 2025; 16: 100252. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100252>.
11. Cheng W., Zhang Y., Wang P. Effect of spatial distribution and number of raw material collection locations on the transportation costs of biomass thermal power plants. *Sustainable Cities and Society*, 2020; 55: 102040. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102040>.
12. Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V., Kalita E.G., Shvetsova V.V., Tikhonov E.A. Analiz gazogeneriruyushchikh sistem dlya avtonomnogo energosnabzheniya lesnykh terminalov. [Analysis of gas generating systems for autonomous power supply of forest terminals]. *Resources and Technology*, 2021; 18(3): 53-76.
13. Anisimov P.N., Medyakov A.A. Razrabotka i chislennoe modelirovanie energoustanovki s gazovoy turbinoy otkrytogo tsikla i parovoy turbinoy s organicheskim rabochim telom. [Development and numerical modeling of a power plant with an open-cycle gas turbine and an organic Rankine cycle steam turbine]. *Energoberezhenie i vodorodgotovka* = [Energy Saving and Water Treatment], 2022; 6(140): 42-46.
14. Anisimov P.N., Shirnin Yu.A., Petukhov I.V. [i dr.]. Razrabotka mobil'noy energoustanovki na drevesnom toplive dlya avtonomnogo energoobespecheniya ob'yektov lesnogo kompleksa. [Development of a mobile wood-fueled power plant for autonomous energy supply of forestry complex facilities]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* = [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2024; 248: 206-219. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.206-219>.
15. Galashov N.N., Tsubul'skiy S.A. Parametricheskii analiz skhemy parogazovoy ustanovki s kombinatsiey trekh tsiklov dlya povysheniya KPD pri rabote v severnykh gazodobyvayushchikh rayonakh. [Parametric analysis of a combined-cycle power plant scheme with a combination of three cycles to improve efficiency in northern gas production regions]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2019; 330(5): 44-55. – DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/274>.
16. Sukmanova T.V., Belov N.S. Tsifrovoy dvoynik kak instrument modelirovaniya i optimizatsii slozhnykh prirodnnykh i tekhnicheskikh sistem. [Digital twin as a tool for modeling and optimizing complex natural and technical systems]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Estestvennye i meditsinskie nauki* = [Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Ser.: Natural and Medical Sciences], 2025; 1: 40-57. – DOI: <https://doi.org/10.5922/vestniknat-2025-1-3>.
17. El Azzaoui A., Kim T.W., Loia V., Park J.H. Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city. In: Park J., Loia V., Yi G., Sung Y. (eds.). *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*. Singapore: Springer Singapore, 2021: 107-113. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9309-3_15.
18. Giuffrida N., Fajardo-Calderin J., Masegosa A.D., Werner F., Steudter M., Pilla F. Optimization and Machine Learning Applied to Last-Mile Logistics: A Review. *Sustainability*, 2022; 14 (9): 1-16.
19. Dzuban A.V., Galstyan A.A., Kovalenko N.A., Uspenskaya I.A. Thermodynamic Modeling of Multicomponent Rare Earth Nitrates Aqueous Systems. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2021; 95 (12): 2394-2404. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024421120074>.
20. Schweizer F., Fürst M., Wachtmeister G. Modeling and Validation of a Two-Phase Flow Valve for Expanders in Waste Heat Recovery. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021; 13 (3): 031022. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048675>.
21. Zhao Z., Zhang J., Wang G., Yuan H., Tian Y. Research and clearance analysis on of steam twin-screw expander employed in industrial waste heat recovery. *Energy*, 2024; 312: 133439. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133439>.
22. Lee S., Kim D., Ha H., Kim M.S. Pressure energy recovery of LNG integrated with multi-stage feedwater fuel preheaters in a combined cycle power plant. *Energy*, 2023; 285: 128694. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128694>.

Сведения об авторах

Петруша Сергей Витальевич – аспирант кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>, e-mail: ros-nano@yandex.ru.

Тихонов Евгений Андреевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

✉ *Морковин Владимир Александрович* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Перфильев Павел Николаевич – кандидат технических наук, зав. кафедрой лесопромышленных производств и обработки материалов ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Ревяко Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины природообустройства» Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К.Кортунова - филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru.

Information about the authors

Sergey V. Petrusha – Postgraduate Student of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0879-6499>, e-mail: ros-nano@yandex.ru.

Evgeny A. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petrsu.ru.

✉ *Vladimir A. Morkovin* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: morkovin-vladimir@mail.ru.

Olga A. Kunitskaya – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Pavel N. Perfiliev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Timber Industry and Materials Processing of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-7512>, e-mail: p.perfilev@narfu.ru.

Sergey I. Revyako – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Environmental Management Machines" Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov - branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>, e-mail: revyako77@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/12>

УДК 630*3 621.866-82



Исследование динамики гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством

Александр А. Полумиско¹✉, alex-polumisko@mail.ru <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>

Петр И. Попиков¹, popikovpetr@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Нина С. Камалова¹, rcamel@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

Иван Д. Евсиков¹, evsfan1997@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>

Петр А. Пуятин¹, petya.putyatin26@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9038-8494>

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

Проведен анализ современных исследований по динамике гидроприводов манипуляторов грузоподъемных машин. Установлено, что вопросы применения демпфирующих устройств в подъёмных механизмах манипуляторов и их математическое моделирование в переходных режимах до настоящего времени изучены недостаточно. Предложена конструктивная схема гидропривода механизма подъёма стрелы манипулятора с включённым магнитным демпфирующим устройством, обеспечивающим перераспределение энергии и подавление динамических воздействий. Целью представленного исследования является оценка эффективности предложенного магнитного демпфирующего устройства и разработанной математической модели для снижения динамических нагрузок в гидроприводе подъёма стрелы лесного манипулятора. Разработана математическая модель динамики гидропривода, основанная на рекуррентных вычислительных схемах с явной дискретизацией по времени, что обеспечило корректный учет нелинейных свойств системы и позволило получить временные зависимости давления, угла подъёма стрелы и хода магнитного поршня в демпфирующем устройстве. Результаты численного моделирования показали, что применение магнитного демпфирующего устройства обеспечивает снижение максимальных динамических значений давления в гидросистеме подъёма стрелы в 1.4–1.5 раза по сравнению с режимом работы без демпфирования. Давление стабилизируется на уровне около 25 МПа, тогда как в контрольном режиме без демпфера колеблется в диапазоне 31–39 МПа, что сопровождается выраженными колебательными процессами.

Ключевые слова: манипулятор, гидропривод, магнитное демпфирующее устройство, механизм подъёма стрелы, математическая модель, погрузочно-разгрузочные работы, угол подъёма стрелы, давление рабочей жидкости, ход магнитного поршня

Финансирование: данное исследование получило финансирование в рамках внутреннего гранта ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», выделенного в 2025 г. на работу по проекту «Выявление закономерностей режимов работы магнитного демпфирующего устройства гидропривода лесного манипулятора».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи, членов научно-технического совета и лично проректора по науке и инновациям ВГЛУ профессора С.С. Морковину за поддержку исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование динамики гидропривода механизма подъёма стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством / А. А. Полумиско, П. И. Попиков, Н. С. Камалова, И. Д. Евсиков, П. А. Пуятин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 174–190. – Библиогр.: с. 187–189 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/12>.

Поступила 08.07.2025. Пересмотрена 12.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Study of the dynamics of the hydraulic drive of the boom lifting mechanism of a forestry manipulator with a magnetic damping device

Alexander A. Polumisko¹✉, alex-polumisko@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>

Petr I. Popikov¹, popikovpetr@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Nina S. Kamalova¹, rcamel@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

Ivan D. Evsikov¹, evsfan1997@gmail.com  <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>

Petr A. Putyatin¹, petya.putyatin26@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0009-9038-8494>

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

Abstract

An analysis of current research on the dynamics of hydraulic drives for crane manipulators used in hoisting machines is conducted. It is established that the application of damping devices in crane lifting mechanisms and their mathematical modeling in transient conditions have been insufficiently studied to date. A design scheme for a hydraulic drive for a crane boom lift mechanism with an engaged magnetic damping device, which ensures energy redistribution and suppression of dynamic effects, is proposed. The objective of this study is to evaluate the effectiveness of the proposed magnetic damping device and the developed mathematical model for reducing dynamic loads in the hydraulic drive of a forestry crane boom lift. A mathematical model of the hydraulic drive dynamics has been developed, based on recurrent computational schemes with explicit time discretization. This ensures correct consideration of the nonlinear properties of the system and made it possible to obtain time dependencies of pressure, boom lift angle, and magnetic piston stroke in the damping device. Numerical simulation results showed that the use of a magnetic damping device reduces maximum dynamic pressure in the boom lift hydraulic system by 1.4–1.5 times compared to operating without damping. Pressure stabilizes at approximately 25 MPa, whereas in the control mode without a damper, it fluctuates between 31–39 MPa, accompanied by pronounced oscillations.

Keywords: manipulator, hydraulic drive, magnetic damping device, boom lifting mechanism, mathematical model, loading and unloading operations, boom lifting angle, working fluid pressure, magnetic piston stroke

Funding: The study was carried out by the local grant of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, allocated for the project “Identification of patterns in the operating modes of the magnetic damping device of the hydraulic drive of a forestry manipulator” in 2025.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article, the members of the Scientific and Technical Council and personally the Vice-Rector for Science and Innovation at VSUFT Professor S.S. Morkovina for the research supporting.

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

For citation: Polumisko A. A., Popikov P. I., Kamalova N. S., Evsikov I. D., Putyatin P. A. (2026). Study of the dynamics of the hydraulic drive of the boom lifting mechanism of a forestry manipulator with a magnetic damping device. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 174–190 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/12>.

Received 08.07.2025.

Revised 12.02.2026.

Accepted 15.03.2026.

Published online 27.03.2026.

Введение

В современной научной литературе вопросам снижения динамических нагрузок манипуляторных систем в лесной технике уделяется значительное внимание. К наиболее перспективным направлениям относятся использование магнитных демпфирующих устройств и совершенствование кинематических и динамических моделей гидроприводов манипуляторов лесных машин.

П.И. Попиков и др. (2023) [1] исследовали динамические режимы подъёма стрелы лесного манипулятора и влияние компоновки гидроцилиндров на динамические нагрузки. Построена математическая модель подъёма стрелы с учётом инерции и податливости гидросистемы. Выявлено, что при уменьшении номинальной подачи насоса угловая скорость механизма стремится к стабилизации, но пиковые давления возрастают с 16 до 40 МПа, что указывает на необходимость согласования параметров

гидросистемы. Установлено оптимальное положение точки крепления штока гидроцилиндра механизма подъема к стреле манипулятора. Повышение податливости гидролиний в два раза снижает динамическое давление, а общая оптимизация конструкции приводит к уменьшению динамических нагрузок на 41%, однако при этом наблюдается увеличение времени затухания колебаний на 32%, что рассматривается как допустимый компромисс ради повышения ресурса машины.

Т. Раин (2023) [2] разработал программный модуль для моделирования кинематики и динамики робота-манипулятора, реализованный в SolidWorks и MATLAB. Модуль включает методы Денавита–Хартенберга, Ньютона–Эйлера, а также адаптивные нечёткие алгоритмы (ANFIS), что обеспечивает возможность моделирования движений, построения траекторий, визуализации и имитационного анализа манипуляторов с пятью степенями свободы. Это подтверждает устойчивую тенденцию перехода инженерных исследований к комплексным цифровым двойникам.

А.А. Волошкин и др. (2022) [3] выполнили создание трёхмерной кинематической модели манипулятора Delta в системе NX с последующим динамическим анализом. Решена обратная задача кинематики, определены центры масс и траектории движения подвижной платформы. Представлена методика расчёта скоростей и ускорений, что позволяет использовать модель для оптимизации параметров привода и проектирования механизмов аналогичного типа.

В работе Guoqiang Zhou и др. (2024) [4] исследовалась гидравлическая вибрационная система с вращательным распределительным клапаном, разработанная для снятия остаточных напряжений материалов. Построены математические модели, проведены CFD-симуляции и эксперименты. Показано, что система обеспечивает близкую к синусоидальной форму колебаний при низких потерях давления. Авторы отмечают, что повышение входного давления и снижение скорости привода увеличивает энергоэффективность вибросистемы, что является перспективным подходом для демпфирования в гидроприводах.

Г.А. Геворкян (2022) [5] развивает обобщённый метод Ньютона–Эйлера для моделирования манипуляторов с упругими звеньями без обращения матрицы масс, что значительно снижает вычислительные затраты. Реализованы алгоритмы решения смешанной задачи динамики, что особенно важно для реального времени и систем активного подавления вибраций.

Моделированию движений харвестера при выборочных рубках посвящена работа

Т.В. Сергеевой и др. (2024) [6]. Созданы математические зависимости для расчёта траектории манипулятора при наличии препятствий в лесном массиве. Показано, что присутствие деревьев нецелевой группы в зоне работы манипулятора увеличивает длительность операций на 15%, что подчёркивает важность планирования траекторий для повышения эффективности и минимизации цикловых нагрузок на гидросистему.

В. Жога и др. (2020) [7] разработали динамическую модель трипод-манипулятора, учитывающую массу исполнительных звеньев и характеристики электроприводов. Получены зависимости управляющих усилий и динамических погрешностей, что позволяет формировать оптимальные управляющие программы для высокоскоростных манипуляторов параллельной структуры.

С.А. Братчиков и др. (2021) [8] представили аналитическое решение обратной задачи кинематики для антропоморфного манипулятора, позволяющее преобразовывать декартовы координаты в обобщённые углы в реальном времени без необходимости решать систему трансцендентных уравнений. Это обеспечивает высокую точность и вычислительную эффективность, что актуально для систем с ограниченной вычислительной мощностью.

Xinyang Tian и др. (2020) [9] предложили аналитический метод ОЗК для 7-звенных манипуляторов с алгоритмом обхода предельных положений суставов. Введён параметр «угол руки» для управления избыточностью, а оптимизация в нулевом пространстве позволяет избегать сингулярностей и ограничений шарниров. Отмечены высокие скорость и точность метода, что подтверждает возможность его применения в реальном времени.

Проблему высоких динамических нагрузок в подъёмных механизмах карьерных экскаваторов, где амплитуда динамических усилий может превышать статическую более чем в два раза, рассматривают И.В. Зырянов и др. (2024) [10]. Авторы отмечают, что такие нагрузки ведут к усталостным повреждениям элементов конструкции и сокращению ресурса машин. Для их снижения предлагается использовать упругодемпфирующие устройства, основанные на принципах обратных задач динамики и структурного математического моделирования. Построена аналитическая связь между желаемой траекторией усилия и параметрами механизма. Моделирование подъёмного механизма экскаватора ЭКГ-5А с оптимально синтезированным демпфером показало уменьшение динамических нагрузок и сокращение времени переходного процесса при типовых режимах работы.

Т.В. Гришанина и др. (2023) [11] применили метод сил для анализа пространственного движения трехзвенного манипулятора с учетом упругости звеньев и приводов. Разработана модель, основанная на принципе Кастильяно, позволяющая определять перемещения и углы поворота звеньев манипулятора. Показано, что учет упругости шарнирных соединений и инерции звеньев существенно влияет на динамические характеристики системы и точность управления.

В исследовании Guocai Yang (2025) [12] предложен новый метод управления манипулятором с гибкими сочленениями и гармоническим приводом. Метод включает каскадную структуру управления: адаптивный регулятор, торковый и моторный контуры. Использован фильтр Калмана и компенсация трения. Экспериментальные испытания показали высокую точность слежения и эффективное подавление вибраций, вызванных эластичностью передачи.

Д.В. Черник и К.Н. Черник (2020) [13] разработали математическую модель комбинированного манипулятора лесной машины. Модель позволяет рассчитывать геометрические параметры стрелы и рукояти в зависимости от грузового момента и максимального вылета стрелы. Даны рекомендации по проектированию конструктивных элементов манипулятора без использования дорогих CAD-систем.

В работе С.А. Нестерова и др. (2022) [14] проанализированы процессы в многополюсном электромеханическом магнитореологическом демпфере. Получены поля магнитной индукции и скоростей течения магнитореологической жидкости, установлена взаимосвязь магнитного и гидродинамического эффектов. Показано, что изменение формы полюсов и направления токов расширяет диапазон регулирования сопротивления демпфера.

С.А. Сомов и др. (2025) [15] экспериментально исследовали демпфер на основе эластомера с ферромагнитным порошком. Выявлено, что магнитные наполнители увеличивают диссипативные свойства материала и снижают амплитуду колебаний на резонансной частоте, расширяя рабочий диапазон демпфирования. Конструкции были выполнены методом 3D-печати и испытаны на вибростенде.

Р.Р. Саттаров и Д.Р. Гарафутдинов (2020) [16] исследовали изменение магнитного момента управляемого магнитоэлектрического демпфера путем механической реконфигурации магнитной цепи. Показано, что использование постоянных магнитов практически исключает потребление энергии и обеспечивает диапазон управления моментом от 5% до 100%.

Д.Р. Гарафутдинов (2021) [17] рассмотрел способы регулирования магнитного потока в магнитоэлектрических устройствах для увеличения эффективности вихрековых демпферов. Описаны механизмы изменения воздушного зазора и конфигурации магнитной цепи, позволяющие адаптивно управлять демпфирующими свойствами без внешнего питания.

А.Н. Болотов и О.О. Новикова (2023) [18] экспериментально изучили поведение наноструктурированной магнитной жидкости в сильном магнитном поле. Установлено наличие "стоп-эффекта" – высокого предельного напряжения текучести, вызванного структурированием частиц. Работа определяет влияние температуры, времени и напряженности поля на разрушение наноструктуры и трение, что важно для проектирования магнитоожидкостных подшипников и уплотнений.

З.В. Моруна (2025) [19] исследовала динамику углового движения наноспутника с жидкостным и магнитным демпферами. Проведено моделирование стабилизации CubeSat с учетом гравитационных и магнитных моментов. Установлено, что сочетание магнитного и жидкостного демпфирования ускоряет переход в устойчивое положение, а эффективность зависит от параметров орбиты.

В работе И.М. Ячикова и В.И. Ширяева (2020) [20] представлено теоретическое и экспериментальное исследование удержания постоянного магнита в импульсном магнитном поле. Разработана математическая модель одномерного движения магнитного поршня, учитывающая гравитационные и электромагнитные силы. Установлено, что увеличение частоты пульсаций тока в катушке стабилизирует положение магнитного поршня и уменьшает амплитуду его колебаний, в то время как масса магнитного поршня и величина напряжения влияют на устойчивость удержания и потребляемую мощность.

Таким образом, анализ современных исследований по динамике гидроприводов механизмов подъема манипуляторов технологических машин показал, что вопросы применения демпфирующих устройств в подъёмных механизмах манипуляторов и их математическое моделирование в переходных режимах до настоящего времени изучены недостаточно.

Целью представленного исследования является оценка эффективности предложенного магнитного демпфирующего устройства и разработанной математической модели для снижения динамических нагрузок в гидроприводе подъема стрелы лесного манипулятора.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования нами выбран механизм подъема стрелы манипулятора с подключением в гидропривод магнитного демпфирующего устройства (рис. 1), защищенного патентом на изобретение [22]. Отличительной особенностью конструкции является наличие **магнитного демпфирующего устройства 24**, подключённого между гидролиниями 6 и 7 основного гидроцилиндра 4 подъема стрелы 5 посредством регулируемых дросселей 22 и 23. Корпус 24 и крышки 25 и 26 выполнены из

немагнитного материала, а поршни 27, 28 и неподвижная перегородка 29 с центральным дроссельным отверстием 30 являются магнитами, которые обращены друг к другу **одноимёнными полюсами**, что обеспечивает создание магнитного сопротивления при перемещении магнитных поршней. Механизм подъема стрелы оборудован энергосберегающим устройством 16, включающем гидроцилиндр рекуперации энергии 8, обратные клапаны 11, 13, 15, 21, гидролинию 14, гидроаккумулятор 12, разгрузочный клапан 18, предохранительный клапан 19.

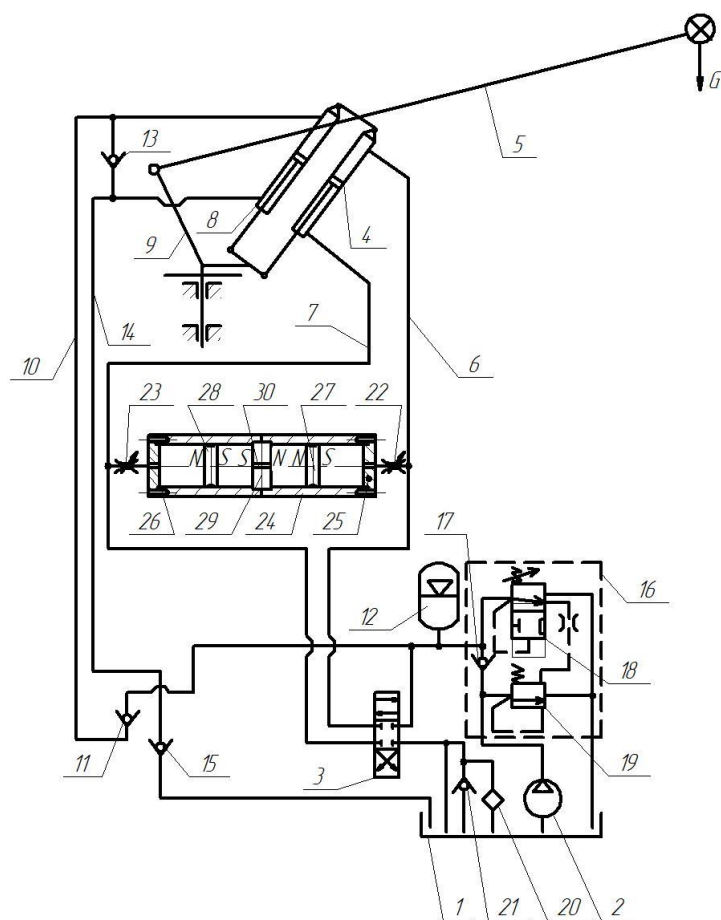


Рисунок 1 – Гидрокинематическая схема механизма подъема стрелы манипулятора с магнитным демпфирующим устройством

Figure 1 – Hydrokinematic diagram of the boom lifting mechanism of a manipulator with a magnetic damping device

Источник: [22]

Source: [22]

Гидропривод подъема стрелы лесного манипулятора, оснащённый магнитным демпфирующим устройством, функционирует следующим образом.

Для подъема грузоподъемной стрелы 5 с грузом **G** насос 2 забирает рабочую жидкость из

гидробака 1 и подает её в гидрораспределитель 3, после чего поток через гидролинию 6 направляется в поршневую полость гидроцилиндра 4 подъема стрелы 5. Под действием давления поршень и шток цилиндра 4 перемещаются вниз, что вызывает

поворот стрелы 5 против часовой стрелки (до 70°) и подъём груза **Г**.

При резком росте давления в линии 6 часть рабочей жидкости, соответствующая объёму деформации упругих звеньев системы, проходит через регулируемый дроссель 22 в магнитное демпфирующее устройство 24, перемещая подвижный магнитный поршень 27 влево. Между одноимёнными северными полюсами **N** поршня 27 и неподвижной перегородки 29 формируется магнитное отталкивающее усилие, которое подавляет пиковое давление, а жидкость вытесняется через дроссельное отверстие 30 в полость между перегородкой 29 и вторым подвижным магнитным поршнем 28. Аналогично, при всплеске давления в гидролинии 7 жидкость через дроссель 23 поступает в магнитное демпфирующее устройство 24, вызывая перемещение магнитного поршня 28 вправо. Между одноимёнными южными полюсами **S** поршня 28 и перегородки 29 также возникает магнитное отталкивание, гасящее импульс давления, а рабочая жидкость вытесняется через отверстие 30 в полость между перегородкой 29 и поршнем 27.

Таким образом, магнитное демпфирующее устройство обеспечивает эффективное подавление гидравлических ударов при внезапных остановках движения стрелы, стабилизируя давление в линиях 6 и 7 и предотвращая перегрузку элементов привода.

Предметом исследования является математическая модель процесса подъема стрелы с учетом подключения в систему магнитного демпфирующего устройства, которая позволяет получить теоретические зависимости кинематических и динамических характеристик.

Для анализа кинематики и динамики рабочих процессов составлены расчетные схемы механизма подъема стрелы (рис. 2) и демпфирующего устройства (рис. 3).

Разработана математическая модель подъема стрелы манипулятора с магнитным демпфирующим устройством:

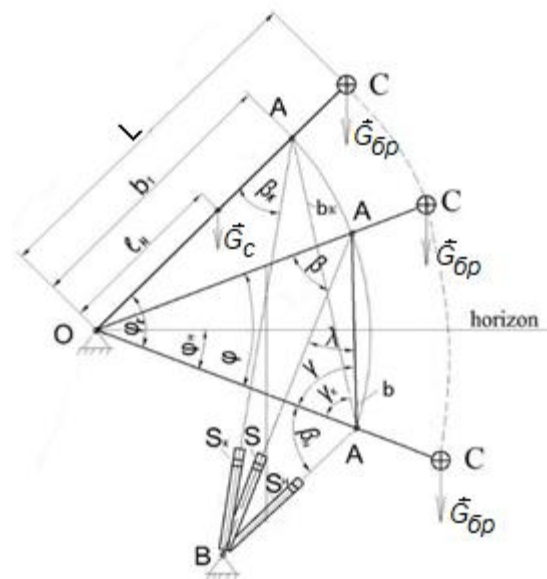


Рисунок 2 – Геометрия движения стрелы манипулятора

Figure 2 – The geometry of the arrow movement of the manipulator

Источник: [21]

Source: [21]

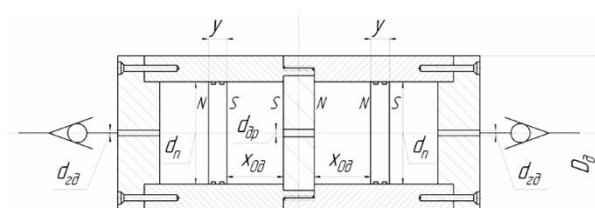


Рисунок 3 – К определению параметров магнитного демпфирующего устройства

Figure 3 – To determine the parameters of a magnetic damping device

Источник: Собственная композиция авторов

Source: Authors' own composition

$$\begin{cases} (J_{bp} + J_c) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} p - (G_{bp} L + G_c l_n) \cos \varphi, \\ q_n n_n = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot \omega + \frac{\pi D_n^2}{4} v_n + a_y p + K_p \cdot \frac{dp}{dt}, \\ m \frac{d^2 x_n}{dt^2} = \frac{\pi D_n^2}{4} \left(p - \frac{D_n^2 \rho}{2 \mu^2 d_{dp}} \cdot \left(\frac{dx_n}{dt} \right)^2 \right) - \frac{B^2 A}{2 \mu_0} \left(\frac{1}{(x_n + y)^2} - \frac{1}{x_n^2} \right) - k \frac{dx_n}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол подъема стрелы, рад; p – текущее значение давления в напорном трубопроводе, Па; x_n – ход магнитного поршня демпфирующего устройства, м; t – время, с; m – масса подвижного магнитного поршня, кг; J_{bp} – момент инерции пачки бревен относительно точки О, кг · м²; J_c – момент инерции стрелы относительно точки О, кг · м²; d_c – внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м; b_1 – расстояние от оси вращения до точки крепления, м; β – угол наклона гидроцилиндра, рад; G_{bp} – сила тяжести пачки бревен в захвате, Н; G_c – сила

тяжести стрелы, Н; L – вылет манипулятора, м; l_n – расстояние от точки О до центра масс стреловой группы, м. q_n – рабочий объём насоса, $\frac{м^3}{об}$; n_n – частота вращения насоса, $\frac{об}{с}$; l – длина стрелы манипулятора, м; ω – угловая скорость приводного стрелы $с^{-1}$, D_d – диаметр корпуса магнитного демпфирующего устройства, м; v_n – скорость магнитного поршня, $\frac{м}{с}$; a_y – коэффициент утечек в гидросистеме, $\frac{м^3}{(Па \cdot с)}$; K_p – коэффициент податливости; $d_{др}$ – диаметр дроссельного отверстия магнитной перегородки, м; μ – коэффициент расхода жидкости; ρ – плотность рабочей жидкости, $\frac{кг}{м^3}$; B_r – остаточная индукция магнитного поршня, Тл; A – площадь сечения магнитного поршня, $м^2$; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; y – длина магнитного поршня, м; k – коэффициент вязкого трения подвижного поршня демпфера, $\frac{Н \cdot с}{м}$.

Перемещение магнитного поршня приводит к изменению объёма его рабочей полости на величину $dV_d = \frac{\pi D_d^2}{4} dx_n$. Соответствующий расход жидкости, обусловленный движением магнитного поршня, равен $Q_d = \frac{\pi D_d^2}{4} \dot{x}_n$, $\dot{x}_n = v_n$ и входит в уравнение баланса расхода напорной линии.

Угол β является функцией угла φ и определяется из выражений [21]:

$$\begin{aligned}\beta &= \gamma - \lambda, \\ \lambda &= \arcsin\left(\frac{S_n}{S} \sin(\beta_n + \gamma)\right), \\ S^2 &= b^2 + S_n^2 - 2bS_n \cos(\beta_n + \gamma), \\ b &= 2b_1 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right), \\ \beta_n &= \arccos\left(\frac{b_k^2 + S_n^2 - S_k^2}{2b_k S_n} - \gamma_k\right), \\ b_k &= 2b_1 \sin\left(\frac{\varphi_k}{2}\right), \\ \gamma_k &= \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_k}{2}, \\ \gamma &= \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2},\end{aligned}$$

где S_n – минимальная длина гидроцилиндра, м;
 S_k – максимальная длина гидроцилиндра, м;
 φ_n – начальное значение угла φ , м;
 φ_k – конечное значение угла φ , м.

Для численного решения замкнутой системы дифференциальных уравнений (1) используется явный метод Эйлера с дискретизацией по времени. Ускорения и силы на каждом временном шаге вычисляются на основе уравнений движения, сформулированных в соответствии со вторым законом Ньютона. Выбор явной схемы Эйлера обусловлен использованием малого шага

интегрирования по времени, обеспечивающего устойчивость расчёта и корректное воспроизведение переходных процессов при умеренных вычислительных затратах. Ниже приведены начальные условия и рекуррентные формулы, позволяющие по значениям на предыдущем временном шаге t_{i-1} получить решение на текущем шаге $t_i = t_{i-1} + dt$:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 0; \\ p_0 &= \frac{4(G_{6p}L + G_{cl_n}) \cos \varphi_n}{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta(\varphi_n)}; \\ v_{0n} &= 0; \\ x_{0d} &= 0,03; \\ \varphi_0 &= \varphi_n; \\ t_0 &= 0.\end{aligned}\quad (2)$$

Значение p_0 в (2) определяется из статического условия равновесия по моментам для заданного начального угла φ_n , обеспечивая начальное состояние без ускорений. Остальные переменные предполагаются равными нулю, что соответствует запуску системы из состояния покоя без предшествующих переходных процессов.

Численное интегрирование первого уравнения из системы (1) можно реализовать через производную угловой скорости, которая рассчитывается на основе текущего значения давления и угла:

$$d\omega_i = \frac{dt}{(J_{6p} + J_c)} \left(\frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta(\varphi_{i-1})}{4} p_{i-1} - (G_{6p}L + G_{cl_n}) \cos \varphi_{i-1} \right). \quad (3)$$

В (3) движущий момент гидроцилиндра, создаваемый давлением p_{i-1} , противопоставляется суммарному моменту сил тяжести стрелы и груза. Геометрический множитель $\sin \beta(\varphi_{i-1})$ моделирует изменение силового плеча при подъёме стрелы.

Динамика давления на основе расходного баланса жидкости (1) может быть описана уравнением:

$$dp_i = \frac{dt}{K_p} \left(q_n n_n - \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta(\varphi_{i-1})}{4} \cdot \omega_{i-1} - \frac{\pi D_d^2 v_{i-1n}}{4} - a_y p_{i-1} \right) \quad (4)$$

Левая часть уравнения (4) отражает изменение давления, связанное с податливостью системы. Правая часть включает в себя: объём подачи насоса; расход, обусловленный движением поршня гидроцилиндра (q_n); расход через демпфер (составляющая, пропорциональная скорости магнитного поршня v_{i-1n}); потери из-за утечек, пропорциональные текущему значению давления.

Второй закон Ньютона для движения магнитного поршня в демпфере реализуется соотношением:

$$dv_{i_n} = \frac{dt}{m} \left(\frac{\pi D_d^2}{4} \left(p_{i-1} - \frac{D_d^4 \rho}{2\mu^2 d_{др}^4} \cdot (v_{i-1n})^2 \right) - \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(x_{i-1d} + y)^2} - \frac{1}{x_{i-1d}^2} \right) - k v_{i-1n} \right), \quad (5)$$

где в правой части в скобках учтены равнодействующая сил давления, отталкивания между одноимёнными полюсами магнитов и вязкое демпфирование.

Для оценки эффективности магнитного демпфирующего устройства дополнительно рассмотрен контрольный режим работы гидропривода без демпфирования. В этом случае связь демпферной ветви с основной гидролинией исключается, что в рамках математической модели эквивалентно принятию параметров $D_d = 0$, $d_{др} \rightarrow \infty$, вследствие чего расход рабочей жидкости через демпфер отсутствует, а динамика давления определяется только подачей насоса, податливостью гидросистемы и инерционными свойствами механизма.

Обновление состояния системы на текущем шаге запишется как

$$\begin{aligned} v_{i_{п}} &= v_{i-1_{п}} + dv_{i_{п}}; \\ x_{i_{д}} &= x_{i-1_{д}} + v_{i-1_{п}} dt; \\ p_i &= p_{i-1} + dp_i; \\ \omega_i &= \omega_{i-1} + d\omega_i; \\ t_i &= t_{i-1} + dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Обновление угла подъёма стрелы будет определяться соответствием:

$$\varphi_i = \begin{cases} \varphi_{i-1} + \omega_{i-1} dt, & \varphi_i < \varphi_k \\ \varphi_k, & \varphi_{i-1} > \varphi_k \end{cases} \quad (7)$$

Полученные соотношения (4) – (7) позволяют по заданному начальному состоянию вычислять последовательные значения переменных на каждом временном шаге.

Результаты

Вычислительное моделирование динамики гидропривода подъёма стрелы с включённым магнитным демпфирующим устройством было выполнено в программе MATLAB на основе рекуррентных вычислительных схем с явной дискретизацией по времени (метод Эйлера).

Полученные временные зависимости позволяют охарактеризовать процесс с позиций динамики давления, кинематики подъёма и работы магнитного демпфирующего устройства. На рис. 4 представлена временная зависимость угла подъёма стрелы. Процесс характеризуется монотонным ростом угла от отрицательного стартового значения до величины порядка 1.22 рад, что соответствует штатной кинематике подъёма. При этом не фиксируется перерегулирования и колебательных составляющих, что указывает на стабильность движения при наличии демпфирующего звена.

На рис. 5 представлена кривая изменения давления в гидроцилиндре подъёма стрелы. В

начальной фазе наблюдается затухающая колебательная составляющая, после чего давление быстро выходит на установившийся уровень порядка ~25 МПа. Полученная форма переходного процесса указывает на подавление динамических выбросов и формирование устойчивого режима работы гидропривода.

Траектория перемещения магнитного поршня внутри демпфера (рис. 6) демонстрирует ограниченный скачкообразный переход в начале процесса и дальнейшую стабилизацию положения в рабочей зоне. Это подтверждает корректность выбора структурной схемы демпфера и способность магнитной системы эффективно гасить энергетику переходного процесса в гидролиниях.

Для подтверждения эффективности предложенного демпфирующего устройства выполнено сравнение переходных процессов давления в гидросистеме при наличии демпфирующего устройства и при его отключении (рис. 7). В режиме без демпфирования давление характеризуется выраженными колебаниями в диапазоне **31–39 МПа**, сохраняющимися на протяжении рассматриваемого интервала времени.

При включении магнитного демпфирующего устройства амплитуда колебаний существенно уменьшается, а давление после кратковременной переходной стадии стабилизируется на уровне около **25 МПа**. Таким образом, применение магнитного демпфирования обеспечивает снижение максимальных динамических значений давления примерно в **1.4–1.5 раза** по сравнению с контрольным режимом без демпфирования, что количественно подтверждает достижение цели исследования.

Статистические параметры полученных временных рядов приведены в таблицах 2–3. Отмечается низкая дисперсия установившихся значений давления, а также отсутствие резких скачков угла и хода магнитного поршня, что согласуется с физически устойчивым характером работы системы. Таким образом, сформированные расчётные данные однозначно подтверждают достижение основной цели исследования — снижение динамической нагруженности гидропривода подъёма стрелы без ухудшения кинематических характеристик рабочего цикла.

Таблица 1

Входные данные программы

Table 1

Program input data

Параметр Parameter		Интервал Interval	Значение Meaning
t_k	время на процесс поднятия стрелы, с time for the boom lifting process, s		7
φ_n	начальное значение угла φ , рад initial value of angle φ , rad		-0.26
φ_k	конечное значение угла φ , рад final value of angle φ , rad		1.4
$x_{0д}$	начальное положение хода магнитного поршня, м initial position of the magnetic piston stroke, m		0.03
$x_{кд}$	максимально допустимая координата магнитного поршня (конструктивный предел), м maximum permissible coordinate of the magnetic piston (design limit), m		0.06
S_n	минимальная длина гидроцилиндра, м minimum length of hydraulic cylinder, m	1...1.5	1.4
S_k	максимальная длина гидроцилиндра, м maximum length of hydraulic cylinder, m	1.8...2.3	2.2
$m_{бр}$	масса пачки бревен, кг weight of a pack of logs, kg		884
m_c	масса стреловой группы, кг mass of the boom group, kg		433
$J_{бр}$	момент инерции пачки бревен относительно точки O, кг·м ² moment of inertia of a stack of logs relative to point O, kg·m ²		$J_{бр} = m_{бр}l^2 = 33435.09$
J_c	момент инерции стрелы относительно точки O, кг·м ² moment of inertia of the boom relative to point O, kg·m ²		$J_c = m_cl^2 = 4830.37$
$G_{бр}$	сила тяжести пачки бревен в захвате, Н gravity of a stack of logs in the grip, N		$G_{бр} = m_{бр}g = 8840$
G_c	сила тяжести стрелы, Н boom gravity, N		$G_c = m_cg = 4330$
d_c	внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м internal diameter of the boom hydraulic cylinder, m		0.1
b_1	расстояние от оси вращения до точки крепления, м distance from the axis of rotation to the attachment point, m		1
L	вылет манипулятора, м manipulator reach, m		6.15
l_n	расстояние от точки O до центра масс стреловой группы, м distance from point O to the center of mass of the boom group, m		3.34
$Q = q_n n_n$	подача в единицу времени, м ³ /с flow per unit time, m ³ /s		0.00133
μ	коэффициент расхода жидкости liquid flow coefficient	0.7...0.8	0.75
D_d	диаметр корпуса магнитного демпфирующего устройства, м diameter of the magnetic damping device body, m		0,064
$d_{др}$	диаметр дроссельного отверстия магнитной перегородки, м magnetic baffle orifice diameter, m	0.001...0.003	0.002

ρ	плотность рабочей жидкости, кг/м ³ working fluid density, kg/m ³		800
k_d	коэффициент вязкого трения магнитного поршня демпфирующего устройства, Н·с/м coefficient of viscous friction of the magnetic piston of the damping device, N·s/m		100
K_p	коэффициент податливости compliance coefficient	$(0.9 \dots 3.3) \cdot 10^{-10}$	$K_p = \frac{V_{\text{сум}}}{E_{\text{нр}}} = 2.1 \cdot 10^{-10}$
m_d	масса магнитного поршня в демпфирующем устройстве, кг mass of the magnetic piston in the damping device, kg	0.2...0.5	0.4
$d_{\text{п}}$	диаметр магнитного поршня демпфирующего устройства, м diameter of the magnetic piston of the damping device, m		0.05
y	длина магнитного поршня демпфирующего устройства, м length of the magnetic piston of the damping device, m		0,03
A	площадь сечения магнитного поршня, м ² cross-sectional area of the magnetic piston, m ²		0,001963495
μ_0	магнитная постоянная, Гн/м magnetic constant, H/m		$1,26 \cdot 10^{-6}$
B_r	остаточная индукция магнита, Тл residual induction of magnet		$2,48 \cdot 10^{-1}$
a_y	коэффициент утечек в гидросистеме, м ³ /(Па·с) leakage coefficient in the hydraulic system, m ³ /(Pa·s)		$2 \cdot 10^{-12}$

Источник: эмпирические данные, полученные авторами

Source: empirical data obtained by the authors

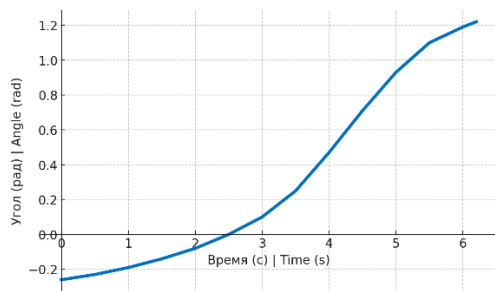


Рисунок 4 – График зависимости угла подъема стрелы φ от времени t

Figure 4 – Graph of elevation angle arrows φ versus time t

Источник: Собственная композиция авторов

Source: Authors' own composition

Таблица 2

Ключевые показатели переходного процесса давления в гидросистеме

Table 2

Key indicators of the transient pressure process in a hydraulic system

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

На основе вычислительного эксперимента, выполненного с применением рекуррентных зависимостей с явной дискретизацией по времени (метод Эйлера), получена зависимость изменения

Ключевые динамические показатели давления $p(t)$ при наличии и отсутствии демпфирования Key dynamic pressure indicators $p(t)$ with and without damping		
Показатель Indicator	С демпфированием With damping	Без демпфирования Without damping
Первый пик давления, МПа First pressure peak, MPa	$\approx 12.4 - 12.8$	$\approx 38 - 40$
Установившееся давление, МПа Steady-state pressure, MPa	≈ 25	Отсутствует absent
Амплитуда колебаний в переходном процессе, МПа Oscillation amplitude in the transient process, MPa	< 0.5	$\approx 4 - 5$
Время выхода на установившийся режим, с Time to reach steady state, s	$\approx 2.0 - 2.5$	не достигается not achieved
Диапазон изменения давления на интервале 0 – 6 с, МПа Pressure change range in the interval 0 - 6 s	$\approx 12.4 - 25$	$\approx 31 - 39$

давления рабочей жидкости в гидроцилиндре механизма подъема стрелы (рис. 5). Обобщённые статистические показатели динамики давления в гидроцилиндре представлены в таблице 3.

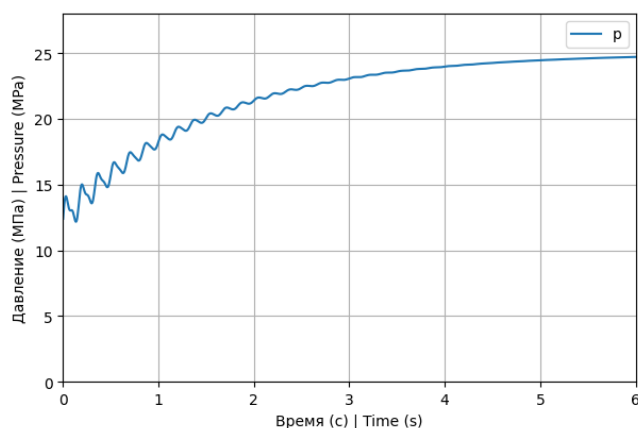


Рисунок 5 – График зависимости давления в напорном трубопроводе p от времени t
Figure 5 – Graph of pressure dependence in the discharge pipeline p versus time t
Источник: Собственная композиция авторов
Source: Authors' own composition

Таблица 3

Показатели работы магнитного демпфирующего устройства по перемещению магнитного поршня x_n
Table 3
Performance of the magnetic damping device based on the movement of the magnetic piston x_n

Ключевые показатели движения магнитного поршня демпфирующего устройства Key performance indicators of the magnetic piston damping device movement			
Показатель Indicator	Значение Value		
Начальная координата магнитного поршня, м Initial coordinate of the magnetic piston, m	0.030		
Максимальная координата магнитного поршня в переходном процессе, м Maximum coordinate of the magnetic piston in the transient process, m	≈ 0.035		
Максимальный ход магнитного поршня, м Maximum stroke of magnetic piston, m	≈ 0.005		
Максимально допустимая координата магнитного поршня (конструктивный предел), м Maximum permissible coordinate of the magnetic piston (design limit), m	0.060		
Использование хода магнитного поршня демпфирующего устройства Using the	$\frac{0.005}{0.060} \cdot 100 \approx 8.3\%$		

magnetic piston stroke of the damping device	

Источник: собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

В результате численного моделирования, выполненного на основе рекуррентных вычислительных схем с явным шагом по времени (метод Эйлера), был получен характерный график изменения положения магнитного поршня в демпфирующем устройстве во времени (рис. 6). В процессе полного хода магнитного поршня в демпфирующем устройстве происходит переток рабочей жидкости между полостями гидроцилиндра в объёме, соответствующем деформации упругих элементов гидросистемы, что обеспечивает подавление скачков давления в переходных режимах работы привода.

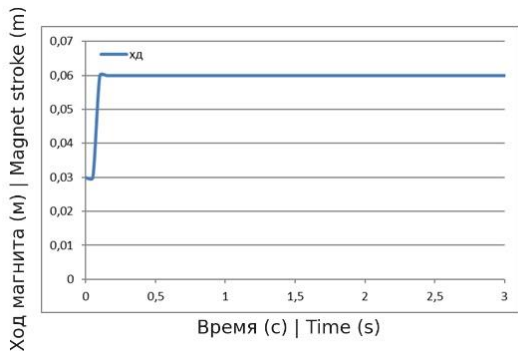


Рисунок 6 – График зависимости хода магнитного поршня x_d от времени t
Figure 6 – Graph of the dependence of the magnetic piston stroke x_d on time t
Источник: Собственная композиция авторов
Source: Authors' own composition

Следует отметить, что значение 0.06 м (табл. 1) задаёт **конструктивно допустимый предел** координаты магнитного поршня (предельный рабочий ход магнитного поршня), тогда как в рассматриваемом переходном процессе фактическое перемещение магнитного поршня составляет около 0.005 м (рис. 6), что обусловлено ограниченным объёмом деформации упругих элементов гидросистемы и отсутствием необходимости использования полного хода магнитного поршня демпфирующего устройства.

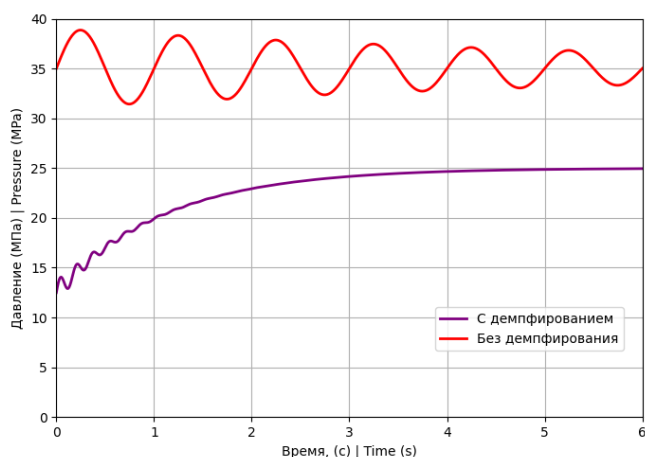


Рисунок 7 – Сравнение временных зависимостей давления в гидросистеме при наличии и отсутствии демпфирования

Figure 7 – Comparison of time dependencies of pressure in a hydraulic system with and without damping

Источник: Собственная композиция авторов
Source: Authors' own composition

На рис. 7 приведено сравнение режимов работы гидропривода подъёма стрелы с магнитным демпфированием и без демпфирующего устройства. Применение магнитного демпфирующего устройства обеспечивает снижение максимальных динамических значений давления в гидросистеме подъёма стрелы примерно в **1.4–1.5 раза** по сравнению с режимом работы без демпфирования. Давление в демпфированном режиме после кратковременных переходных колебаний стабилизируется на уровне около **25 МПа**, тогда как в контрольном режиме без демпфирующего устройства сохраняются выраженные колебания давления в диапазоне **31–39 МПа**. Таким образом, результаты моделирования подтверждают снижение динамической нагруженности гидропривода и формирование устойчивого режима работы механизма при использовании магнитного демпфирования.

Обсуждение

Основным объектом анализа являлось формирование демпфирующих свойств гидропривода подъёма стрелы и снижение динамических нагрузок в переходных режимах. Полученные временные зависимости давления демонстрируют затухающие колебания в начальной фазе и стабилизацию на уровне ~ 25 МПа, что существенно ниже диапазона 31–39 МПа, полученного в контрольном расчёте для режима

работы гидропривода без демпфирования и характерного для стандартных гидросистем лесных машин [1] [5–7]. Таким образом, применение магнитного демпфирующего устройства обеспечивает **снижение динамического максимума давления в 1.4–1.5 раза**, что согласуется с тенденциями, выявленными в исследованиях пассивных и управляемых демпферных модулей [14–17].

Влияние параметров магнитного демпфирующего устройства на динамику гидропривода носит выраженный нелинейный характер. Увеличение остаточной магнитной индукции B_r приводит к росту магнитной силы отталкивания между одноимёнными полюсами, что повышает сопротивление перемещению магнитного поршня и способствует более интенсивному поглощению энергии переходного процесса. В результате снижается амплитуда первичного импульса давления и ускоряется затухание колебаний.

Уменьшение диаметра дроссельного отверстия $d_{др}$ увеличивает гидравлическое сопротивление потоку рабочей жидкости, что приводит к усилению демпфирующего эффекта за счёт роста потерь энергии на дросселировании. При этом чрезмерное уменьшение $d_{др}$ может привести к замедлению реакции системы, что требует рационального выбора параметра.

Масса магнитного поршня m определяет инерционность демпфирующего звена: увеличение массы снижает чувствительность системы к кратковременным импульсам давления, но может повышать время переходного процесса. Таким образом, параметры магнитного демпфера должны выбираться с учётом компромисса между интенсивностью демпфирования и динамической отзывчивостью системы.

Физический механизм демпфирования в рассматриваемой системе основан на пассивной силовой обратной связи, формируемой магнитным отталкиванием между одноимёнными полюсами подвижного магнитного поршня и неподвижной магнитной перегородки. Сила магнитного взаимодействия обратно пропорциональна квадрату

расстояния между магнитами ($\sim \frac{1}{x^2}$), что приводит к резкому росту сопротивляющего усилия при увеличении скорости и амплитуды перемещения магнитного поршня.

В условиях резкого скачка давления в гидрролинии магнитный поршень смещается, уменьшая расстояние между магнитными элементами и вызывая рост отталкивающей силы, направленной противоположно движению. Таким образом, избыточная энергия давления автоматически преобразуется в работу против магнитного поля и диссипируется за счёт гидравлических и вязких потерь. Данный механизм не требует внешнего управления и реализует пассивное саморегулирующееся демпфирование переходных процессов.

Форма переходного процесса давления – с ограниченной амплитудой первичного импульса и быстрым затуханием – соответствует расчетным данным по виброзащите гидросистем и моделям динамики с учетом упругих элементов привода [5–7], [11–12]. Отсутствие вторичных провалов и перерегулирования указывает на корректность энергетического баланса демпферной ветви и подтверждает выводы о повышении устойчивости при управлении магнитным потоком и конфигурацией магнитной цепи [16–17], [20].

Кинематический профиль угла подъёма стрелы характеризуется монотонным ростом без колебательных составляющих, что коррелирует с описанным в литературе временем перехода порядка 6–7 с для лесных кранов-манипуляторов [5–7] и подтверждает устойчивость движения при введении демпфирующего элемента. Характер перемещения магнитного поршня демонстрирует ограниченный по величине скачок и дальнейшую стабилизацию, что согласуется с моделями удержания и динамической стабилизации магнитных элементов [18, 20].

Таким образом, предложенная схема демпфирования обеспечивает **качественное снижение динамических нагрузок**, воспроизводя ключевые закономерности, описанные в фундаментальных работах по динамике

манипуляторов и магнитных демпферных систем, и не противоречит известным экспериментальным и расчётным данным [1–20].

Выводы

1. Проведённый анализ современных исследований показал, что несмотря на наличие работ по динамике гидроприводов механизмов подъёма манипуляторов технологических машин, вопросы интеграции магнитных демпфирующих устройств в подъёмные контуры манипуляторов и их математическое моделирование в переходных режимах до настоящего времени изучены недостаточно.

2. Предложена конструктивная схема гидропривода подъёма стрелы манипулятора с включённым магнитным демпфирующим устройством, обеспечивающим перераспределение энергии и подавление динамических воздействий. Это позволяет повысить устойчивость работы привода и снизить нагрузку на элементы гидросистемы.

3. Разработана математическая модель динамики гидропривода, основанная на рекуррентных вычислительных схемах с явной дискретизацией по времени, что обеспечило корректный учет нелинейных свойств системы и позволило получить временные зависимости давления, угла подъёма стрелы и хода магнитного поршня в демпфирующем устройстве.

4. Результаты численного моделирования показали, что применение магнитного демпфирующего устройства обеспечивает снижение максимальных динамических значений давления в гидросистеме подъёма стрелы в **1.4–1.5 раза** по сравнению с режимом работы без демпфирования. Давление стабилизируется на уровне около **25 МПа**, тогда как в контрольном режиме без демпфера колеблется в диапазоне **31–39 МПа**, что сопровождается выраженными колебательными процессами. Таким образом результаты моделирования подтверждают существенное снижение динамической нагруженности гидропривода при сохранении устойчивых кинематических характеристик механизма.

5. Полученные зависимости и статистические характеристики согласуются с общими тенденциями, описанными в работах других исследователей, а предложенный подход может служить основой для дальнейшей оптимизации энергосиловых параметров, разработки адаптивных демпфирующих устройств и совершенствования конструкций лесных манипуляторов и смежных подъёмно-транспортных систем.

Список литературы

1. Исследование и обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъема лесного манипулятора / П. И. Попиков, И. В. Четверикова, И. Д. Евсиков [и др.] // *Resources and Technology*. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 76-93. – DOI 10.15393/j2.art.2023.7063. – EDN QBUIMY.
2. Раин, Т. Описание программного комплекса для моделирования робота-манипулятора / Т. Раин // *Вестник российских университетов. Математика*. – 2023. – Т. 28, № 141. – С. 90-96. – DOI 10.20310/2686-9667-2023-28-141-90-96. – EDN CDGJPQ.
3. Создание трехмерной кинематической модели манипулятора Delta при помощи системы автоматизированного проектирования в NX / А. А. Волошкин, Л. А. Рыбак, В. М. Скитова [и др.] // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 20-29. – DOI 10.31776/RTCJ.11103. – EDN KMVEGF.
4. Zhou G., Zhao G., Wang H. Characterization of rotary valve control vibration system for vibration stress relief applications. *Scientific Reports*. 2024; 14(1): 9434. DOI: 10.1038/s41598-024-59970-z. – EDN: GQDEKY.
5. Геворкян, Г. А. Моделирование манипуляторов с упругими звеньями без обращения их матриц масс / Г. А. Геворкян // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2022. – Т. 62, № 3. – С. 521-528. – DOI 10.31857/S0044466922030061. – EDN PFQGKU.
6. Моделирование движений харвестера при выборочных рубках леса / Т. В. Сергеева, К. П. Рукомойников, Е. М. Царев [и др.] // *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 6. – С. 134-142. – DOI 10.28983/asj.y2024i6pp134-142. – EDN KTWDNS.
7. Modeling dynamic of tripod manipulator considering mass of actuating links / V. Zhoga, V. Dyashkin-Titov, I. Nesmiyanov [et al.] // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics, NIR 2020, Innopolis, 03–06 декабря 2020 года. – Innopolis, 2020. – P. 9290240. – DOI 10.1109/NIR50484.2020.9290240. – EDN JCGXIP.
8. Братчиков, С. А. Решение обратной задачи кинематики манипулятора / С. А. Братчиков, Е. А. Абрамова, Ю. В. Федосов // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2021. – № 56. – С. 4-11. – DOI 10.17223/19988605/56/1. – EDN JHCZQD.
9. Tian, X. An analytical inverse kinematics solution with joint limits avoidance of 7-DOF anthropomorphic manipulators without offset / X. Tian, Q. Xu, Q. Zhan // *Journal of the Franklin Institute*. – 2021. – Vol. 358, No. 2. – P. 1252-1272. – DOI 10.1016/j.jfranklin.2020.11.020. – EDN INNJDJ.
10. Параметрический синтез упругодемпфирующих устройств в копающих механизмах карьерных экскаваторов / И. В. Зырянов, А. А. Иов, И. А. Иов, В. А. Храмовских // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2024. – № 4. – С. 121-133. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_4_0_121. – EDN ZIAEII.
11. Гришанина, Т. В. Применение метода сил для расчета пространственного движения манипулятора с массивным твердым телом с учетом упругости звеньев и поворотных приводов / Т. В. Гришанина, С. В. Русских, Ф. Н. Шклярчук // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2023. – № 11(764). – С. 92-103. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-11-92-103. – EDN MBZNIO.
12. Yang G., Liu Y., Mingh J. A new control method of flexible-joint manipulator with harmonic drive. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020; 234(9): 095440. DOI: 10.1177/0954406219899697. – EDN: GGXGDK.
13. Chernik, D. V. Mathematical model of a combined manipulator of a forest machine / D. V. Chernik, K. N. Chernik // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52037. – DOI 10.1088/1757-899X/919/5/052037. – EDN GXJUJR.
14. Нестеров, С. А. Расчет и анализ процессов в многополюсном электромеханическом магнитореологическом демпфере / С. А. Нестеров, Ю. Б. Казаков, В. А. Филиппов // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2022. – № 1. – С. 18-22. – EDN QMGIRR.
15. Динамические испытания демпфера на основе эластомера с ферромагнитным порошковым наполнителем / С. А. Сомов, М. А. Косков, А. С. Иванов, Г. В. Степанов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 76-88. – DOI 10.21869/2223-1528-2025-15-2-76-88. – EDN YJWRWL.
16. Саттаров, Р. Р. Исследование электромагнитного поля управляемого магнитоэлектрического демпфера / Р. Р. Саттаров, Д. Р. Гарафутдинов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 28-35. – DOI 10.17122/1999-5458-2020-16-3-28-35. – EDN LUNNGB.
17. Гарафутдинов, Д. Р. Регулирование магнитного потока в магнитоэлектрических устройствах / Д. Р. Гарафутдинов // *Мавлютовские чтения : Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции*. В 6-ти томах, Уфа, 25–27 октября 2022 года. Том 3. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 349-354. – EDN KGIJFI.

18. Болотов, А. Н. Экспериментальное изучение текучести наноструктурированной магнитной жидкости в сильном магнитном поле / А. Н. Болотов, О. О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – № 15. – С. 692-700. – DOI 10.26456/pcascnn/2023.15.692. – EDN FLAPPJ.
19. Морина, З. В. Динамика углового движения космических аппаратов с диссипативным демпфером / З. В. Морина // Труды МАИ. – 2025. – № 142. – EDN NHDCSA.
20. Ячиков, И. М. Определение динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле / И. М. Ячиков, В. И. Ширяев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 111-122. – DOI 10.14529/ctcr200312. – EDN QLNCP.
21. Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортировочного, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты / Д. С. Богданов, А. В. Попикова, И. Д. Евсиков [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2(54). – С. 127-143. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8. – EDN FHIJX.
22. Патент на полезную модель № 230802 U1 Российская Федерация, МПК B66C 13/42. Гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством: № 2024127518: заявл. 18.09.2024; опубл. 19.12.2024 / А. А. Сидоров, П. И. Попиков, Е. В. Поздняков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". – EDN YKCBY.

References

1. Research and justification of the layout and parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator / P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, I. D. Evsikov [et al.] // Resources and Technology. - 2023. - Vol. 20, No. 3. - P. 76-93. - DOI 10.15393/j2.art.2023.7063. - EDN QBUIMY.
2. Rain, T. Description of the software package for modeling a robotic manipulator / T. Rain // Bulletin of Russian Universities. Mathematics. - 2023. - Vol. 28, No. 141. - P. 90-96. - DOI 10.20310/2686-9667-2023-28-141-90-96. - EDN CDGJPQ.
3. Creation of a three-dimensional kinematic model of the Delta manipulator using the NX computer-aided design system / A. A. Voloshkin, L. A. Rybak, V. M. Skitova [et al.] // Robotics and technical cybernetics. - 2023. - Vol. 11, No. 1. - P. 20-29. - DOI 10.31776/RTCJ.11103. - EDN KMVEGF.
4. Zhou G., Zhao G., Wang H. Characterization of rotary valve control vibration system for vibration stress relief applications. Scientific Reports. 2024; 14(1): 9434. DOI: 10.1038/s41598-024-59970-z. – EDN: GQDEKY.
5. Gevorkyan, G. A. Modeling of manipulators with elastic links without inverting their mass matrices / G. A. Gevorkyan // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. - 2022. - Vol. 62, No. 3. - P. 521-528. - DOI 10.31857/S0044466922030061. - EDN PFQGU.
6. Modeling of harvester movements during selective logging / T. V. Sergeeva, K. P. Rukomoynikov, E. M. Tsarev [et al.] // Agrarian scientific journal. - 2024. - No. 6. - P. 134-142. - DOI 10.28983/asj.y2024i6pp134-142. - EDN KTWDNS.
7. Modeling dynamic of tripod manipulator considering mass of actuating links / V. Zhoga, V. Dyashkin-Titov, I. Nesmiyanov [et al.] // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics, NIR 2020, Innopolis, 03–06 декабря 2020 года. – Innopolis, 2020. – P. 9290240. – DOI 10.1109/NIR50484.2020.9290240. – EDN JCGXIP.
8. Bratchikov, S. A. Solution of the inverse problem of manipulator kinematics / S. A. Bratchikov, E. A. Abramova, Yu. V. Fedosov // Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Informatics. - 2021. - No. 56. - P. 4-11. - DOI 10.17223/19988605/56/1. - EDN JHCZQD.
9. Tian, X. An analytical inverse kinematics solution with joint limits avoidance of 7-DOF anthropomorphic manipulators without offset / X. Tian, Q. Xu, Q. Zhan // Journal of the Franklin Institute. – 2021. – Vol. 358, No. 2. – P. 1252-1272. – DOI 10.1016/j.jfranklin.2020.11.020. – EDN INNJDU.
10. Параметрический синтез упругодемпфирующих устройств в копающих механизмах карьерных экскаваторов / И. В. Зырянов, А. А. Иов, И. А. Иов, В. А. Храмовских // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 4. – С. 121-133. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_4_0_121. – EDN ZIAEII.
11. Grishanina, T. V. Application of the force method to calculate the spatial motion of a manipulator with a massive rigid body taking into account the elasticity of links and rotary drives / T. V. Grishanina, S. V. Russkikh, F. N. Shklyarchuk // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. - 2023. - No. 11 (764). - P. 92-103. - DOI 10.18698/0536-1044-2023-11-92-103. - EDN MBZNIO.
12. Yang G., Liu Y., Mingh J. A new control method of flexible-joint manipulator with harmonic drive. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020; 234(9): 095440. DOI: 10.1177/0954406219899697. – EDN: GGXGDK.

13. Chernik, D. V. Mathematical model of a combined manipulator of a forest machine / D. V. Chernik, K. N. Chernik // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, 31 июля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 919. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 52037. – DOI 10.1088/1757-899X/919/5/052037. – EDN GXJUJR.
14. Nesterov, S. A. Calculation and analysis of processes in a multi-pole electromechanical magnetorheological damper / S. A. Nesterov, Yu. B. Kazakov, V. A. Filippov // Electronics and electrical equipment of transport. - 2022. - No. 1. - P. 18-22. - EDN QMGIRR.
15. Dynamic tests of a damper based on an elastomer with a ferromagnetic powder filler / S. A. Somov, M. A. Koskov, A. S. Ivanov, G. V. Stepanov // Bulletin of the South-West State University. Series: Engineering and Technology. - 2025. - Vol. 15, No. 2. - Pp. 76-88. - DOI 10.21869/2223-1528-2025-15-2-76-88. - EDN YJWRWL.
16. Sattarov, R. R. Study of the electromagnetic field of a controlled magnetoelectric damper / R. R. Sattarov, D. R. Garafutdinov // Electrical and information complexes and systems. - 2020. - Vol. 16, No. 3. - P. 28-35. - DOI 10.17122/1999-5458-2020-16-3-28-35. - EDN LUNNGB.
17. Garafutdinov, D. R. Regulation of magnetic flux in magnetoelectric devices / D. R. Garafutdinov // Mavlyutov readings: Proceedings of the XVI All-Russian youth scientific conference. In 6 volumes, Ufa, October 25–27, 2022. Volume 3. – Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2022. – P. 349–354. – EDN KGIJFJ.
18. Bolotov, A. N. Experimental study of the fluidity of a nanostructured magnetic fluid in a strong magnetic field / A. N. Bolotov, O. O. Novikova // Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. - 2023. - No. 15. - P. 692-700. - DOI 10.26456/pcascnn/2023.15.692. - EDN FLAPPJ.
19. Morina, Z. V. Dynamics of angular motion of spacecraft with a dissipative damper / Z. V. Morina // Proceedings of MAI. - 2025. - No. 142. - EDN HHDCCA.
20. Yachikov, I. M. Determination of dynamic parameters of a permanent magnet when it is held in a pulsed magnetic field / I. M. Yachikov, V. I. Shiryaev // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics. - 2020. - Vol. 20, No. 3. - P. 111-122. - DOI 10.14529/ctcr200312. - EDN QLNCPT.
21. Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of a timber truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on the Euler and Runge-Kutta methods / D. S. Bogdanov, A. V. Popikova, I. D. Evsikov [et al.] // Forestry journal. - 2024. - Vol. 14, No. 2 (54). - P. 127-143. - DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8. - EDN FHIJXX.
22. Utility Model Patent No. 230802 U1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive for a timber crane boom lifting mechanism with a magnetic damping device: No. 2024127518: declared 18.09.2024: published 19.12.2024 / A. A. Sidorov, P. I. Popikov, E. V. Pozdnyakov [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov". – EDN YKCB DY.

Сведения об авторах

✉ *Полумиско Александр Алексеевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>, e-mail: alex-polumisko@mail.ru.

Попиков Пётр Иванович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Камалова Нина Сергеевна – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: rcamel@yandex.ru

Евсиков Иван Дмитриевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: evsfan1997@gmail.com.

Путятин Пётр Анатольевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9038-8494>, e-mail: petya.putyatin26@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Alexander A. Polumisko* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>, e-mail: alex-polumisko@mail.ru.

Pyotr I. Popikov – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machinery Design, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Nina S. Kamalova – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, email: rcamel@yandex.ru.

Ivan D. Evsikov – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: evsfan1997@gmail.com.

Petr A. Putyatin – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazeva St., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9038-8494>, e-mail: petya.putyatin26@gmail.com.

✉ Для контактов / Corresponding author

**Двухэшелонная транспортная задача и транзитные вершины
в лесопромышленном производстве: модель оптимизации**

Родион С. Рогулин, rafassiaofusa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>

ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», ул. Гоголя, д. 41, г. Владивосток, 690014,
Российская Федерация

Работа посвящена разработке и исследованию двухэшелонной модели транспортной логистики, ориентированной на задачи планирования перевозок в лесопромышленном комплексе с учётом реальной пространственной структуры транспортной сети. Транспортная система описывается в виде графа G , включающего депо I_0 , промежуточные распределительные пункты I_H , конечных потребителей I_C и транзитные вершины I_T , отражающие элементы инфраструктуры и обеспечивающие связность сети. Такой подход позволяет отказаться от агрегированных расстояний и явно учитывать влияние топологии сети на формирование маршрутов. Логистический процесс формализуется как согласованная двухэшелонная задача, в которой первый эшелон отвечает за магистральную доставку продукции от депо к системе хабов, а второй — за распределение грузов от хабов к потребителям с учётом спроса и ограничений по вместимости транспортных средств. Принципиальной особенностью модели является совместная оптимизация решений обоих эшелонов в рамках единой целевой функции, что позволяет корректно учитывать их взаимное влияние. Апробация модели выполнена на транспортной сети, сформированной на основе пространственной конфигурации Приморского края — региона с развитой лесопромышленной специализацией и сложной инфраструктурой перевозок. Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют корректность предложенной постановки, устойчивость получаемых решений и их интерпретируемость в условиях ограниченных транспортных ресурсов. Предложенный подход может использоваться как инструмент анализа и поддержки решений при планировании транспортной логистики в лесопромышленном комплексе и смежных отраслях.

Ключевые слова: *многоуровневая транспортная система; MILP-модель; маршрутизация грузоперевозок; графовая модель инфраструктуры; логистика лесных ресурсов*

Для цитирования: Рогулин, Р. С. Двухэшелонная транспортная задача и транзитные вершины в лесопромышленном производстве: модель оптимизации / Р. С. Рогулин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 191–208. – Библиогр.: с. 205–208 (34 назв). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/13>.

Поступила 16.01.2026. Пересмотрена 30.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Two-Echelon Transportation Problem and Transshipment Nodes in Forest Industry Production: An Optimization Model

Rodion S. Rogulin, rafassiaofusa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>

Vladivostok State University, 41 Gogolya St., Vladivostok, 690014, Russian Federation

Abstract

The paper is devoted to the development and analysis of a two-echelon transportation logistics model focused on planning problems in the forest industry while explicitly accounting for the real spatial structure of the transportation network. The transportation system is represented as a graph G that includes a depot I_0 , intermediate distribution hubs I_H , final consumers I_C , and transshipment nodes I_T that reflect infrastructure elements and ensure network connectivity. This representation makes it possible to abandon aggregated distance measures and explicitly capture the impact of network topology on route formation. The logistics process is formalized as an integrated two-echelon problem in which the first echelon is responsible for trunk transportation from the depot to the system of hubs, while the second echelon handles the distribution of goods from hubs to consumers subject to demand satisfaction and vehicle capacity constraints. A key feature of the proposed model is the joint optimization of decisions at both echelons within a single objective function, which allows their mutual interactions to be taken into account consistently. The model is validated using a transportation network constructed on the basis of the spatial configuration of Primorsky Krai, a region characterized by a developed forest industry and a complex transportation infrastructure. The results of computational experiments demonstrate the correctness of the proposed formulation, the stability of the obtained solutions, and their interpretability under conditions of limited transportation resources. The proposed approach can be used as an analytical and decision-support tool for transportation logistics planning in the forest industry and related sectors.

Keywords: *multi-level transportation system; MILP model; freight routing; graph-based infrastructure model; forest resources logistics*

For citation: Rogulin R. S. (2026). Two-Echelon Transportation Problem and Transshipment Nodes in Forest Industry Production: An Optimization Model. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 191–208 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/13>.

Received 16.01.2026. **Revised** 3 0.01.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Логистика лесопромышленного комплекса формируется в условиях протяжённых территорий, неоднородной транспортной инфраструктуры и высокой зависимости себестоимости продукции от характеристик перевозок [1-9]. Существенная часть логистических решений связана с организацией доставки грузов от пунктов производства и заготовки к потребителям при наличии промежуточных узлов перераспределения, что требует использования более сложных моделей по сравнению с классическими одноуровневыми схемами [10-18].

В рамках данной работы процесс транспортировки описывается как двухэшелонная система, включающая последовательную доставку продукции от депо I_0 к промежуточным распределительным пунктам I_H , а затем — распределение грузов от хабов к конечным потребителям I_C . Перевозки осуществляются по транспортному графу G , содержащему также транзитные вершины I_T , отражающие реальные элементы инфраструктуры и обеспечивающие связность сети.

Такая постановка позволяет учитывать ограничения по вместимости транспортных средств, объёмы поставок и пространственную структуру сети без сведения расстояний к упрощённым метрикам. Использование графового представления и явного разделения эшелонов создаёт основу для согласованной оптимизации маршрутов и потоков в условиях, характерных для лесопромышленного производства [19-25].

В отличие от большинства классических постановок 2E-VRP, где транспортная сеть задаётся полным графом на агрегированных расстояниях, в настоящей работе модель формируется на **разреженном транспортном графе** с транзитными вершинами, отражающими реальные элементы дорожной инфраструктуры (развязки, промежуточные пункты, соединительные участки). Это позволяет строить решения, интерпретируемые в терминах фактической связности сети, что

Формулировка задачи

В работе рассматривается задача планирования перевозок в лесопромышленном комплексе, представляемая в виде двухэшелонной транспортной задачи на инфраструктурном графе G . Вершины графа включают депо I_0 , множество промежуточных распределительных пунктов I_H , множество конечных потребителей I_C , а также транзитные вершины I_T , предназначенные для описания реальной структуры транспортных связей между логистическими объектами.

Процесс доставки продукции организуется в два функционально различных уровня. На первом эшелоне формируется маршрут перевозки, начинающийся в депо I_0 , проходящий через все хабы $i \in I_H$ и завершающийся возвратом в исходную точку. Данный уровень отвечает за распределение объёмов продукции между хабами и задаёт пространственную основу дальнейших перевозок. На втором эшелоне осуществляется доставка продукции от хабов к потребителям $j \in I_C$ с использованием ограниченного набора

особенно важно для лесопромышленных регионов с неоднородной транспортной доступностью.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. предложена двухэшелонная постановка перевозок, в которой маршруты обоих эшелонов строятся **строго по транспортному графу** с транзитными вершинами, а не по полному графу расстояний;

2. обеспечена **согласованность эшелонов** через балансовые ограничения, связывающие объёмы, доставляемые на хабы, и объёмы распределения по потребителям;

3. выполнена вычислительная апробация подхода на сетевой конфигурации, репрезентативной для условий лесопромышленной логистики (Приморский край), с анализом структуры маршрутов и загрузки ресурсов.

транспортных средств $k \in K$, каждое из которых связано ровно с одним хабом.

Для каждого потребителя $c \in C$ задан детерминированный спрос q_c . В базовой постановке рассматривается **полное обслуживание спроса**: каждый потребитель должен быть обслужен ровно одним маршрутом второго эшелона при соблюдении ограничений по вместимости и структуре транспортного графа. Перемещение грузов допускается исключительно по дугам графа $G = (V, E)$, включая маршруты, проходящие через транзитные вершины, что отражает реальную связность и ограничения инфраструктуры.

Задача заключается в определении такой совокупности маршрутов и объёмов перевозок на обоих эшелонах, при которой суммарные транспортные издержки минимальны, а все структурные, ресурсные и ограничения спроса выполнены.

Обзор литературы

Двухэшелонная маршрутизация и задачи класса location-routing

Двухэшелонные задачи маршрутизации (Two-Echelon Vehicle Routing Problem, 2E-VRP) рассматривают транспортную систему, в которой доставка осуществляется в два уровня: магистральный (от источника/центрального склада к промежуточным узлам консолидации) и распределительный (от промежуточных узлов к конечным пунктам). Современная систематизация 2E-VRP представлена в обзоре [1], где предложена классификация вариантов (2E-CVRP, 2E-VRP-TW и др.), сопоставлены математические формулировки и семейства алгоритмов (exact/heuristic), а также обозначены типовые узкие места вычислительной реализуемости при росте размерности сети.

По смыслу близким, но более общим, является класс задач совместного размещения объектов и маршрутизации (Location-Routing Problem, LRP), где решения о выборе/открытии объектов (хабов, спутниковых складов) и построении маршрутов принимаются интегрированно. Обзор по вариантам и расширениям LRP представлен в [2] и полезен для позиционирования двухэшелонной модели как частного случая интегрированного проектирования логистической сети. В части точных методов для LRP важной опорной работой является branch-and-cut метод для емкостной постановки [3], задающий стандарт того, как должны выглядеть строгие MILP-формулировки и их вычислительная валидация. Для двухэшелонного варианта LRP существенна работа [4], где сопоставлены три компактные MILP-формулировки и показаны практические компромиссы между точностью и масштабируемостью. В совокупности эти результаты задают методологическое основание: если в прикладной задаче хабы/транзитные узлы фиксированы или предопределены инфраструктурой, то 2E-VRP естественно описывает согласованную оптимизацию двух уровней перевозок; если же размещение/выбор промежуточных объектов является частью решения, модель переходит к 2E-LRP-контексту.

Точные MILP-подходы и масштабируемость: разбиение множества и метод ветвей, отсечений и генерации столбцов.

Практика исследований VRP-класса показывает, что вычислительная реализуемость в значительной мере определяется выбором формулировки и техник усиления ограничений. Классическим основанием exact-подходов является set-partitioning-формулировка с дополнительными сечениями [5], которая стала базой для современных ветвящихся методов (branch-and-cut/branch-and-price) в задачах маршрутизации. Развитие данного направления представлено в виде улучшенного branch-cut-and-price для CVRP [6] и robust-варианта branch-cut-and-price [7], где показано, какие техники стабилизации и организации pricing-подзадачи позволяют решать существенно более крупные экземпляры. Обобщающим и методологически важным источником является учебно-обзорная статья [8], систематизирующая branch-cut-and-price для VRP (включая обработку time windows, неоднородности флота и др.) и тем самым задающая «инженерный стандарт» построения вычислительно устойчивых схем для MILP-моделей маршрутизации.

Для корректной сопоставимости вычислительных экспериментов особую роль играют общепринятые бенчмарки и принципы генерации тестовых экземпляров. В этом отношении ключевым источником является набор бенчмарков CVRP [9], который часто используется как точка отсчета при валидации алгоритмов и позволяет переносить методологию вычислительных экспериментов на двухэшелонные постановки (через декомпозицию/построение эквивалентных подзадач).

Декомпозиционные подходы и матэвристики: преодоление ограничений компактной MILP для получения эффективных вычислительных схем.

По мере усложнения постановок (двухэшелонность, транзитные узлы, ограничения сети, неоднородность ресурсов) прямое решение компактной MILP часто становится вычислительно тяжёлым. Стандартным ответом является декомпозиция, в частности logic-based Benders decomposition (LBBD), которая была введена как

общая схема для крупномасштабных дискретных задач [10] и далее систематизирована в виде современного обзора методов и практик применения [11]. Для 2E-VRP принципиально важно, что LBBD позволяет отделить высокоуровневые решения (структура эшелонов, распределение потоков/назначение) от маршрутизационной части, тем самым снижая размерность комбинаторного ядра.

Непосредственно для двухэшелонной маршрутизации LBBD-подход разработан и экспериментально проверен в [12], где предложено разложение 2E-VRP на master-задачу и подзадачи маршрутизации/сопоставления, и показано преимущество такого подхода относительно прямых формулировок на части тестов. Дополнительно, в [13] демонстрируется гибридизация LBBD с метаэвристикой для ускорения, что отражает общий тренд «matheuristics»: использование MILP-решателя в качестве компонента в эвристической/метаэвристической схеме для получения решений высокого качества на больших экземплярах.

В спектре эвристических методов для VRP-класса базовым инструментом является Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS), предложенный в семинальной работе [14] (на примере PDPTW), где сформулирована общая destroy/repair-логика и механизмы адаптации. Для широкого класса VRP важен также гибридный генетический алгоритм с управлением разнообразием [15], который часто используется как модуль в комбинированных схемах. На уровне специализированных постановок 2E-VRP значимым примером matheuristic-подхода является метод для двухэшелонной multi-trip маршрутизации [16], в котором комбинируются высокоуровневое распределение/назначение и детальная маршрутизационно-расписательная часть. Пример расширения 2E-VRP за счет транзитивных узлов и нерегулярных водителей (occasional drivers), решаемый с помощью ALNS-семейства, приведен в [17] и показывает, как в 2E-структуру встраиваются дополнительные типы узлов и ресурсов.

Отдельная линия методологии связана с «модульностью» и управлением внешними

ресурсами, что важно для прикладных сетей с ограниченной пропускной способностью промежуточных звеньев. Matheuristic-подход к распределению внешних ресурсов в модульных VRP предложен в [18], и его идеи применимы к сценариям усиления мощностей (например, временные площадки/склады, дополнительный транспорт) в двухэшелонной структуре. В прикладных контекстах, где допускаются частичные поставки/многократные посещения, полезен обзор по split-delivery VRP [19], поскольку он дает готовый понятийный аппарат для строгого введения/запрета дробления спроса, что часто становится предметом рецензентских вопросов в 2E-постановках.

Наконец, для задач большой размерности усиливается интерес к масштабированию эвристик за счет обучения и параллельных вычислений. В [20] предложен механизм адаптации LNS с использованием deep reinforcement learning, а в [21] — параллельный ALNS на распределенной вычислительной среде (Spark). Хотя эти работы не являются «лесными» по предметной области, они задают современную повестку по масштабируемости, релевантную для реальных территориальных сетей с сотнями и тысячами вершин.

Лесная логистика: специфика перевозок древесины, инфраструктура и параметры

Для лесопромышленного комплекса транспортная составляющая является ключевым источником издержек и рисков устойчивости цепи поставок, что объясняет высокий интерес к оптимизационным моделям маршрутизации, расписаний и интеграции с пространственными данными. Обзор прикладных задач маршрутизации и расписаний в перевозке древесины представлен в [22], где обсуждаются ограничения и операционные особенности (времена погрузки/разгрузки, режимы работы, эффективность оборота). Отдельный обзор инструментов и приложений оптимизации транспортировки древесины дан в [23], включая DSS/GIS-инструменты, что важно для корректной «привязки» VRP-моделей к реальным графам дорог и технологическим ограничениям.

С точки зрения параметризации и обоснования емкостных ограничений существенны

эмпирические работы по дальним автомобильным перевозкам круглого леса. В [24] представлен глобальный обзор long-distance road transportation industrial roundwood, включая типовые диапазоны грузоподъемности и дальностей, что позволяет обосновывать реалистичные значения параметров задач 2E-VRP в лесном контуре. Экономический эффект нормативов по полной массе транспортного средства (GVW) и их влияние на издержки анализируется в [25]; такие результаты важны для сценарного анализа (например, изменение нормативов/ограничений в регионе) и для корректного задания емкостей и функции затрат.

С точки зрения «логики управления» в цепи поставок древесины важны компромиссы между сроками (lead time) и качеством/потерями, что показано в [26] на уровне транспортных стратегий и консолидации. Это напрямую поддерживает двухэшелонную постановку, поскольку наличие промежуточной консолидации (хабы/терминалы/площадки) часто является инструментом управления компромиссом между скоростью, стабильностью и затратами.

Для лесной логистики также критичен пространственный слой и особенности лесных дорог. GIS-ориентированные подходы к выбору маршрутов и оценке дорожной сети рассматриваются в [27], где показана многокритериальная постановка для лесных дорог. Использование GIS-ориентированных систем поддержки решений для планирования лесных перевозок описано в [28], что формирует методологическое обоснование того, почему транспортную сеть в прикладной задаче корректно задавать как граф с транзитными вершинами и неполной связностью, а не как полный граф с агрегированными расстояниями.

Наконец, прикладные исследования подчеркивают необходимость адаптации сети к шокам и нарушениям рынка/логистики. В [29] рассматривается адаптация региональных сетей поставок в условиях disruptions на примере timber-рынка, что поддерживает мотивировку сценарного и стресс-тестового анализа. Роль цифровизации в канадских цепях поставок mass timber и влияние цифровых технологий на координацию и логистику

обсуждается в [30], а инициативы и практики Nordic precision wood supply отражены в отраслевом отчете [31]. Эти источники в совокупности показывают, что прикладные модели транспортной оптимизации в лесном комплексе развиваются в сторону более детального учета данных, инфраструктурных ограничений и технологий управления.

Региональный контекст: Дальний Восток и Приморский край как ограниченная инфраструктурой сеть

Для регионально-ориентированных приложений двухэшелонных моделей важна связка «структура сети ↔ инфраструктурные ограничения». В части международных коридоров и логистического развития Дальнего Востока акцент делается на транспортные коридоры и хабы, формирующие направления потоков и точки консолидации [32]. Описания инфраструктуры порта Владивосток и связности с железнодорожными и морскими направлениями используются как обоснование выбора узлов-хабов и их роли в мультимодальной связности региона [33]. Дополнительно, аналитические материалы о крупных инвестиционных проектах в логистической инфраструктуре Приморского края важны для сценарной постановки (изменение пропускной способности узлов и появление новых терминалов), что влияет на структуру двухэшелонной сети [34].

Таким образом, современная литература по 2E-VRP/LRP задает устойчивый методологический каркас двухуровневой маршрутизации и интегрированного проектирования сети [1–4], а исследования по exact-подходам и вычислительной методологии показывают, какие формулировки и техники необходимы для воспроизводимых и масштабируемых результатов [5–9]. Для практических задач двухэшелонной маршрутизации важны декомпозиционные и matheuristic-схемы (LBBD, ALNS-семейство и гибриды), которые позволяют переносить строгие постановки на более крупные сети и сложные ограничения [10–21]. При этом прикладной контур лесной логистики подчеркивает необходимость реальной параметризации (емкости, GVW-ограничения, экономические эффекты), а также пространственной детализации дорожной сети и поддержки решений

на основе GIS, что естественным образом приводит к графовой постановке с транзитными вершинами [22–31]. Региональный контекст Приморского края и Дальнего Востока усиливает значимость учета инфраструктурных узлов и ограничений сети,

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является разработка формализованного подхода к согласованной оптимизации транспортных процессов в лесопромышленном комплексе, основанного на двухэшелонной структуре перевозок и явном представлении транспортной инфраструктуры в виде графа с транзитными вершинами.

Достижение поставленной цели предполагает построение модели, в которой магистральные перевозки и распределительные доставки рассматриваются не как независимые или последовательно решаемые задачи, а как взаимосвязанные компоненты единой логистической системы. Такой подход ориентирован на устранение выявленного в обзоре литературы методологического разрыва между одноуровневыми моделями маршрутизации, агрегированными многоэшелонными схемами и реальными условиями функционирования лесопромышленной логистики.

Для реализации указанной цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. **Формализация транспортной структуры лесопромышленного комплекса.** Разработать графовую модель транспортной сети, включающую депо I_0 , промежуточные распределительные пункты I_H , конечных потребителей I_C и транзитные вершины I_T , обеспечивающую явный учёт топологии реальной инфраструктуры без сведения её к полному графу или укрупнённым метрикам расстояний.
2. **Построение согласованной двухэшелонной транспортной постановки.** Сформулировать математическую модель транспортировки, в которой:
 - первый эшелон описывает магистральную доставку продукции от депо к системе хабов с обязательным посещением всех узлов I_H ;

формируя прикладную мотивацию для двухэшелонной структуры и сценарного анализа [32–34].

- второй эшелон моделирует распределение потоков от хабов к потребителям с учётом спроса и ограничений по вместимости транспортных средств;
- обеспечивается баланс объёмов между эшелонами и их согласованность в рамках единой целевой функции.

3. Разработка алгоритмического подхода к решению задачи.

Реализовать метод решения, допускающий применение к транспортным сетям с транзитными вершинами и различной маршрутизационной логикой эшелонов, и обеспечивающий получение допустимых решений в условиях ограниченных ресурсов.

4. Численная апробация модели.

Провести вычислительные эксперименты на данных, приближённых к реальным условиям функционирования лесопромышленного комплекса, и проанализировать структуру получаемых маршрутов, распределение потоков и степень удовлетворения спроса.

5. Оценка практической интерпретируемости результатов.

Проанализировать возможности использования полученных решений для выявления узких мест логистической системы и поддержки управленческих решений в задачах планирования транспортных процессов в лесопромышленном комплексе и смежных отраслях.

Математическая модель

В соответствии с поставленной целью и сформулированными задачами далее вводится математическая модель двухэшелонной транспортной системы, предназначенная для согласованного описания магистральных и распределительных перевозок в условиях реальной транспортной инфраструктуры. Модель основывается на графовом представлении сети и ориентирована на одновременный учёт маршрутизационных решений первого и второго эшелонов, ограничений по вместимости транспортных средств и баланса перевозимых объёмов между уровнями. Такое формализованное описание позволяет перейти от концептуальной постановки задачи к строгой оптимизационной модели, пригодной для численного анализа и экспериментальной апробации на транспортных сетях, характерных для лесопромышленного комплекса.

1. Множества и индексы

- $G = (V, E)$ – исходный транспортный граф.
- $V = I_0 \cup I_1 \cup I_2 \cup I_T$:
 - $I_0 = \{0\}$ – депо (одно).
 - I_1 – множество хабов.
 - I_2 – множество потребителей.

3. Переменные

3.1. Переменные 1-го эшелона (маршрут по хабам)

- $x_{ij}^{(1)} \in \{0,1\}$ для $i \neq j, i, j \in N_1$:
 $x_{ij}^{(1)} = 1$, если дуга $i \rightarrow j$ входит в тур 1-го эшелона.
- $u_i \in [0, |H|]$ для $i \in N_1$:
 порядковая переменная для устранения подтуров (MTZ).
- $s_h \geq 0$ для $h \in H$:
 объем, доставленный на хаб h первым эшелоном.

3.2. Переменные 2-го эшелона (маршруты ТС от хабов)

- $a_{kh} \in \{0,1\}$ для $k \in K, h \in H$:
 $a_{kh} = 1$, если ТС k назначено (стартует и возвращается) на хаб h .

○ I_T – множество транзитных вершин.

- $H := I_1$ – хабы, индекс h .
- $C := I_2$ – потребители, индекс c .
- $N_1 := I_0 \cup H$ – узлы 1-го эшелона (депо+хабы), индексы $i, j \in N_1$.
- $N_2 := H \cup C$ – узлы 2-го эшелона (хабы+потребители), индексы $i, j \in N_2$.
- $K := \{1, \dots, m\}$ – доступные ТС второго эшелона, индекс k .

2. Параметры:

- $d_c \geq 0$ – спрос потребителя $c \in C$.
- $Q > 0$ – вместимость состава/перевозки первого эшелона (общее количество, которое можно развести по хабам).
- $q > 0$ – вместимость одного ТС второго эшелона.
- $m \in \mathbb{N}$ – максимальное число ТС второго эшелона.

Графовые стоимости:

- $D_{ij} \geq 0$ – стоимость/длина кратчайшего пути между вершинами i и j в исходном графе G .
 $D = \text{distances}(G)$, где G построен по E , а веса рёбер – по стоимости/длине.

- $x_{kij}^{(2)} \in \{0,1\}$ для $k \in K, i \neq j, i, j \in N_2$:
 $x_{kij}^{(2)} = 1$, если ТС k проходит дугу $i \rightarrow j$.
- $y_{kc} \in \{0,1\}$ для $k \in K, c \in C$:
 $y_{kc} = 1$, если потребитель c обслуживается ТС k .
- $f_{kij} \geq 0$ для $k \in K, i \neq j, i, j \in N_2$:
 поток груза на дуге $i \rightarrow j$ в маршруте ТС k (используется для вместимости и устранения подтуров).

4. Целевая функция (минимизация суммарной стоимости)

$$\min Z = \sum_{i \in N_1} \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} D_{ij} x_{ij}^{(1)} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq i}} D_{ij} x_{kij}^{(2)}$$

5. Ограничения

5.1. Первый эшелон: один тур по всем хабам с возвратом в депо

(1) Ровно один выход и один вход для каждого узла $i \in N_1$:

$$\sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ij}^{(1)} = 1, \forall i \in N_1, \sum_{\substack{j \in N_1 \\ j \neq i}} x_{ji}^{(1)} = 1, \quad \forall i \in N_1$$

(2) Устранение подтуров:

зафиксируем $u_0 = 0$ для депо $0 \in I_0$, а для хабов $h \in H$:

$$1 \leq u_h \leq |H|, \forall h \in H, \\ u_i - u_j + |H|x_{ij}^{(1)} \leq |H| - 1, \forall i \in H, \forall j \in H, i \neq j$$

Это обеспечивает связность тура и исключает циклы, не содержащие депо.

Использование MTZ-ограничений на первом эшелоне обусловлено тем, что число хабов, как правило, существенно меньше числа потребителей, и компактная MTZ-формулировка обеспечивает приемлемую вычислительную сложность при сохранении связности тура. Для задач с большим числом узлов первого эшелона возможен переход к более сильным формулировкам и методам усиления модели (например, set-partitioning и branch-cut-and-price подходы), однако в рамках данной статьи выбран компактный вариант, достаточный для экспериментальной апробации.

(3) Баланс объемов первого эшелона:

$$\sum_{h \in H} s_h \leq Q, s_h \geq 0, \forall h \in H$$

5.2. Второй эшелон: маршруты ТС от хабов к потребителям (CVRP-тип)

5.2.1. Назначение ТС по хабам

(4) Каждое ТС либо не используется, либо назначается ровно одному хабу:

$$\sum_{h \in H} a_{kh} \leq 1, \forall k \in K$$

5.2.2. Обслуживание потребителей

(5) Каждый потребитель обслуживается ровно одним ТС (полное обслуживание):

$$\sum_{k \in K} y_{kc} = 1, \forall c \in C$$

5.2.3. Связь y_{kc} и дуг маршрута

Для каждого ТС k и потребителя c требуем ровно один вход и один выход, если он обслуживается:

(6) Степенные ограничения на потребителях:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} x_{kcj}^{(2)} = y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C, \\ \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} x_{kic}^{(2)} = y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C$$

5.2.4. Маршрут начинается и заканчивается в выбранном хабе

(7) Для каждого ТС k : число выходов из хабов равно числу входов в хабы и равно факту использования ТС:

$$\sum_{h \in H} \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x_{khj}^{(2)} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \forall k \in K, \\ \sum_{h \in H} \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x_{kih}^{(2)} = \sum_{h \in H} a_{kh}, \forall k \in K$$

(8) Запрещаем посещение хабов без назначения:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} x_{khj}^{(2)} \leq a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H, \\ \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} x_{kih}^{(2)} \leq a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H$$

Эти ограничения гарантирует, что ТС k может выходить/входить только в «свой» хаб.

5.2.5. Ограничения по вместимости и устранение подтуров через поток f

Идея: поток f_{kij} – это количество груза, перевозимого ТС k по дуге $i \rightarrow j$.

Он обеспечивает:

- вместимость: на дугах нельзя везти больше q ,

- связность маршрута: нельзя получить отдельный цикл потребителей без хаба,
- доставку спросов.

(9) Вместимость на дугах:

$$0 \leq f_{kij} \leq qx_{kij}^{(2)}, \forall k \in K, \forall i \neq j, i, j \in N_2$$

(10) Баланс потока на потребителях (если потребитель обслуживается ТС k , то из потока «вычитается» d_c):

$$\sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq c}} f_{kic} - \sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq c}} f_{kcj} = d_c y_{kc}, \forall k \in K, \forall c \in C$$

(11) Стартовый поток на хабе:

Пусть хаб h выбран для ТС k . Тогда суммарный «выходящий» поток из h равен сумме спросов клиентов, обслуженных ТС k :

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c y_{kc} \cdot a_{kh}, \forall k \in K, \forall h \in H$$

Чтобы это осталось линейным, заменяем правую часть линейной связкой через вспомогательные переменные $w_{kch} \in \{0,1\}$, означающие «потребитель c обслужен ТС k и хаб h выбран»:

$$\begin{aligned} -w_{kch} &\leq y_{kc}, \\ -w_{kch} &\leq a_{kh}, \\ -w_{kch} &\geq y_{kc} + a_{kh} - 1, \end{aligned}$$

и тогда:

$$\sum_{\substack{j \in N_2 \\ j \neq h}} f_{khj} - \sum_{\substack{i \in N_2 \\ i \neq h}} f_{kih} = \sum_{c \in C} d_c w_{kch}, \forall k \in K, \forall h \in H$$

5.3. Связь эшелонов: сколько завезли в хабы и сколько из них развезли

Суммарный спрос клиентов, закрепленных за хабом h (через все ТС, стартующие в h), не должен превышать завезенный объем s_h , и при полной доставке – равен ему:

(12) Баланс в хабе (полная доставка спроса):

$$s_h = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} d_c w_{kch}, \forall h \in H$$

Тогда автоматически:

$$\sum_{h \in H} s_h = \sum_{c \in C} d_c,$$

и совместно с $\sum_h s_h \leq Q$ получаем условие выполнимости: $\sum_c d_c \leq Q$.

6. Домены переменных

$$x_{ij}^{(1)} \in \{0,1\}, a_{kh} \in \{0,1\}, x_{kij}^{(2)} \in \{0,1\}, y_{kc} \in \{0,1\},$$

$$w_{kch} \in \{0,1\}$$

$$s_h \geq 0, f_{kij} \geq 0, u_0 = 0, 1 \leq u_h \leq |H|$$

7. Алгоритм решения и вычислительная реализация

В Сформулированная модель относится к классу смешанно-целочисленных линейных задач (MILP) и содержит большое число бинарных переменных маршрутизации, что определяет комбинаторный характер вычислительной сложности. В рамках данной работы задача решается методом точной оптимизации с использованием MILP-решателя (**linprog Matlab**), что обеспечивает получение допустимого решения и позволяет контролировать качество по оптимизационному разрыву.

Вычисления выполнялись на платформе (CPU Apple M1 Max, 64 Гб, MacOS 15.7.2 (24G325)). Для решателя задавались параметры: ограничение времени T_{max} (сек), допустимый оптимизационный разрыв gap , а также стандартные настройки ветвления и отсечения. Качество решения оценивается по значению целевой функции Z , суммарному пробегу по эшелонам, числу задействованных транспортных средств второго эшелона и времени счета.

Отметим, что для больших сетей перспективными являются декомпозиционные схемы (например, logic-based Benders decomposition для двухэшелонных задач) и matheuristic-подходы, совмещающие MILP-ядро и адаптивные эвристики. Однако в настоящей работе основной акцент сделан на формализации модели и экспериментальной проверке корректности на репрезентативной транспортной сети.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная часть исследования направлена на: (i) проверку выполнимости и

корректности предложенной MILP-модели на разреженном транспортном графе с транзитными вершинами; (ii) получение количественных характеристик структуры маршрутов первого и второго эшелонов; (iii) оценку использования транспортных ресурсов при заданных ограничениях вместимости. В качестве основных показателей

рассматриваются: значение целевой функции Z , суммарный пробег первого и второго эшелонов, число задействованных транспортных средств второго эшелона, загрузка мощностей (по ограничению вместимости), время счета и оптимизационный разрыв решателя.

1. Описание экспериментальной постановки

Для проведения вычислительных экспериментов используется транспортная сеть, сформированная на основе пространственной конфигурации Приморского края Российской Федерации — региона с развитой лесопромышленной специализацией и высокой интенсивностью внешних грузопотоков. Выбор данного региона обусловлен необходимостью учитывать протяжённые маршруты перевозок, сложную структуру инфраструктуры и повышенные требования к согласованности магистральных и распределительных перевозок.

Тестовый экземпляр включает одно депо, 10 хабов, 20 конечных потребителей и 166 транзитных вершин, число вершин графа $|V| = 196$, ребер графа²⁷ $|E| = 1056$, вместимость перевозки 1-го эшелона $Q_1 = 730$, вместимость одного ТС 2-го эшелона $Q_2 = 120$, максимальное число ТС 2-го эшелона $m = 10$.

Результаты оптимизации маршрутов

Решение двухэшелонной транспортной задачи, полученное в результате работы оптимизационного алгоритма, представлено на рисунке 2 в виде совокупности маршрутов первого и второго эшелонов, наложенных на транспортный граф G . Найденное решение демонстрирует корректное взаимодействие между уровнями транспортировки и выполнение всех структурных ограничений модели.

Маршрут первого эшелона формируется как замкнутый обход, исходящий из депо I_0 , последовательно охватывающий все промежуточные распределительные пункты I_H и

2. Транспортная система моделируется в виде графа G , вершины которого соответствуют реальным логистическим объектам. В состав множества вершин входят депо I_0 , интерпретируемое как предприятие по заготовке и первичной переработке древесины, промежуточные распределительные пункты I_H , представляющие складские и консолидационные узлы, конечные потребители I_C , а также транзитные вершины I_T , отражающие элементы транспортной инфраструктуры. Пространственное положение вершин задаётся на основе географических координат, а связи между ними формируются в соответствии с существующей сетью автомобильных и железнодорожных маршрутов. Веса рёбер определяются длинами кратчайших путей по транспортной сети, что позволяет учитывать реальную топологию инфраструктуры при построении оптимизационных решений.

завершающийся возвратом в исходную точку. Данный маршрут обеспечивает доставку заданных объёмов продукции на хабы и определяет пространственную конфигурацию дальнейшего распределения грузов.

На втором эшелоне выполняется обслуживание потребителей I_C за счёт маршрутов транспортных средств, стартующих и завершающихся в соответствующих хабах. Эти маршруты имеют локальный характер и формируются с учётом ограничений по вместимости и спросу. Все перемещения осуществляются по допустимым путям графа G , включая дуги,

²⁷ В модели используется ориентированный граф, поэтому каждое ребро инфраструктуры учитывается в обоих направлениях.

проходящие через транзитные вершины I_T , что подтверждает работоспособность модели на инфраструктурной сети без её упрощения.

3. Совместный анализ маршрутов показывает согласованность решений обоих эшелонов и **Анализ удовлетворения спроса и использования транспортных средств**

Результаты распределения спроса между конечными потребителями I_C представлены на рисунке 3 и позволяют оценить степень выполнения требований модели в условиях заданных ресурсных ограничений. Для каждого потребителя отображается величина спроса, факт его обслуживания и назначение транспортного средства второго эшелона, связанного с соответствующим хабом I_H .

В рассматриваемой экспериментальной постановке используется режим **полного обслуживания спроса**: каждому потребителю назначается ровно одно транспортное средство второго эшелона, а суммарный объём поставок по всем маршрутам соответствует заданным значениям

адаптацию структуры перевозок к пространственному размещению логистических объектов.

спроса. Таким образом, результаты эксперимента интерпретируются, как конфигурация маршрутов и распределения потоков при заданных ресурсных ограничениях и структуре транспортного графа.

Анализ назначения транспортных средств показывает, что маршруты второго эшелона формируются с учётом пространственного расположения потребителей и структуры транспортного графа G , включая транзитные вершины I_T . Это позволяет оценить уровень загрузки транспортных средств и выявить влияние инфраструктурных ограничений на уровень удовлетворения спроса.

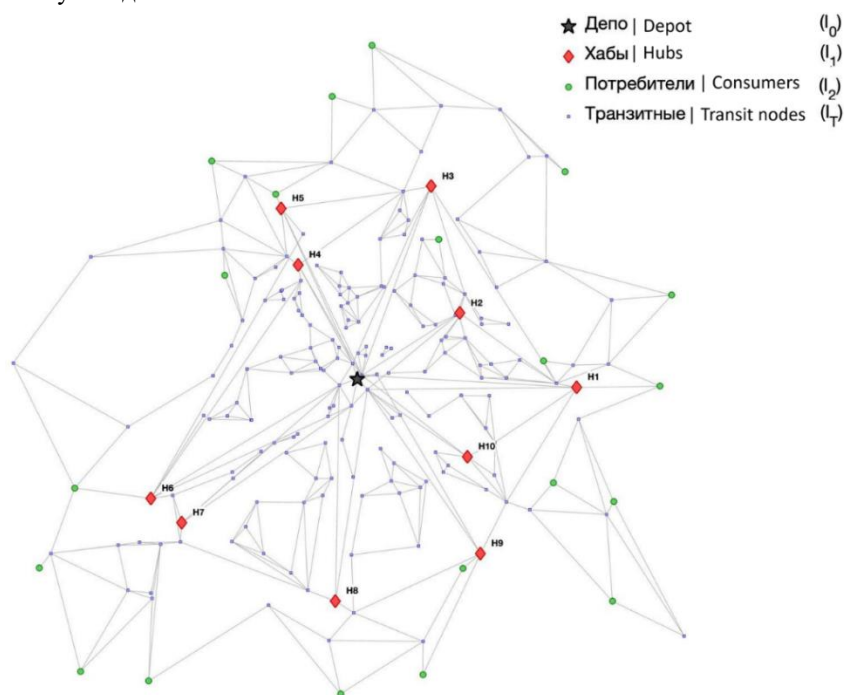


Рисунок 1 – Визуализация распределения депо, хабов, потребителей, транзитных пунктов и их смежность

Figure 1- Visualization of the distribution of depots, hubs, consumers, transit points and their adjacency

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

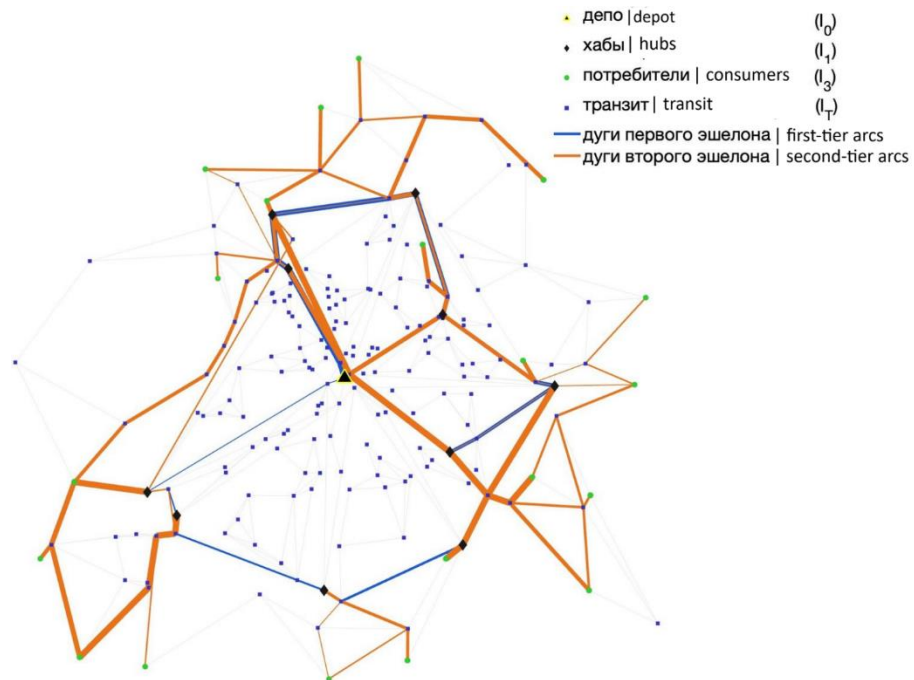


Рисунок 2 – Визуализация графа решения поставленной задачи
 Figure 2 – Visualization of the solution graph for the given problem

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

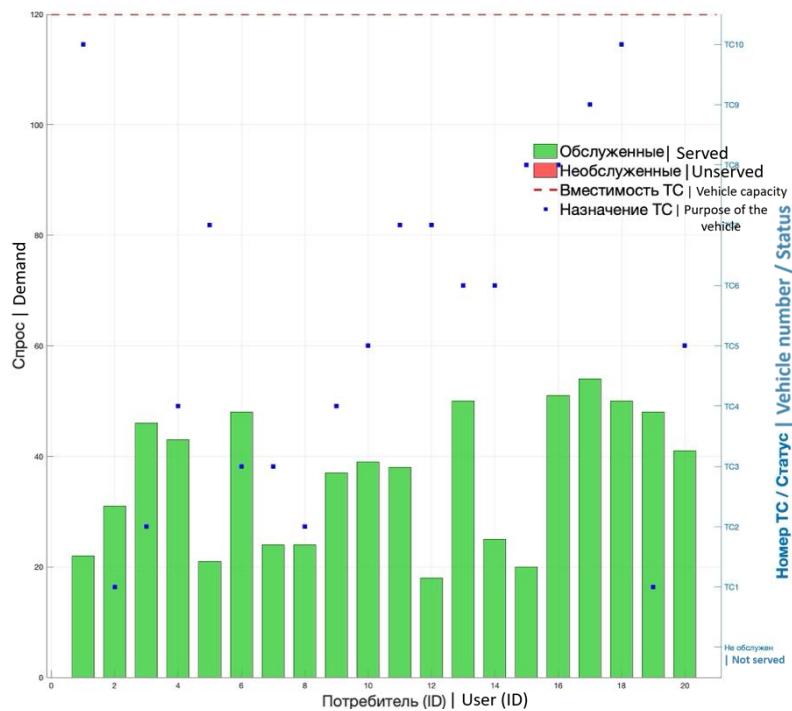


Рисунок 3 – Визуализация распределения спроса по конечным потребителям
 Figure 3 – Visualization of demand distribution by end consumers

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

Обсуждение результатов

Полученные вычислительные результаты подтверждают работоспособность предложенной двухэшелонной модели при решении транспортной задачи на инфраструктурном графе G , включающем депо I_0 , хабы I_H , конечных потребителей I_C и транзитные вершины I_T . Найденные решения удовлетворяют всем структурным и ресурсным ограничениям и демонстрируют согласованное функционирование магистрального и распределительного уровней перевозок.

Пространственная конфигурация транспортной сети задаётся в виде графа, в котором вершины соответствуют депо, хамам, потребителям и транзитным пунктам дорожной инфраструктуры. Рёбра графа формируются по фактической связности дорожной сети, а веса дуг интерпретируются как протяжённость/стоимость перемещения между смежными узлами. Такой способ задания сети обеспечивает интерпретируемость получаемых маршрутов и принципиально отличается от постановок, использующих полный граф на агрегированных расстояниях.

Особое значение имеет интерпретация необслуженного спроса. В рамках модели данный эффект отражает объективные ограничения транспортных ресурсов и пространственное размещение логистических объектов, а не недостатки алгоритмической реализации. Это позволяет использовать результаты оптимизации не только для построения маршрутов, но и для анализа пропускной способности системы и выявления потенциальных направлений её развития.

В целом результаты подтверждают применимость предложенного подхода для анализа и планирования транспортной логистики в лесопромышленном комплексе в условиях сложной инфраструктуры.

Заключение

В рамках проведённого исследования разработана и апробирована математическая модель двухэшелонной транспортной задачи для условий лесопромышленной логистики, в которой

транспортная инфраструктура представлена в виде разреженного графа с транзитными вершинами. Предложенная постановка обеспечивает согласование решений двух эшелонов: на первом эшелоне формируется магистральный обход депо и хабов, а на втором эшелоне выполняется распределение потоков от хабов к конечным потребителям с учётом ограничений по вместимости транспортных средств и топологии транспортной сети.

Экспериментальная проверка выполнена на тестовом инфраструктурном графе размерности $|V| = 197$ и $|E| = 1056$, включающем 1 депо, 10 хабов, 20 потребителей и 166 транзитных вершин. В эксперименте использовалось $m = 10$ транспортных средств второго эшелона с вместимостью $Q_2 = 120$; суммарный спрос составил 730 единиц продукции. По результатам оптимизации получено допустимое решение с целевым значением $Z = 1619.0$, при этом стоимость первого эшелона составила $Z_1 = 247.4$, а второго эшелона — $Z_2 = 1371.6$. Все потребители были обслужены полностью (20 из 20), объём доставок составил 730 единиц, необслуженный спрос отсутствует.

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной модели в условиях реальной связности транспортной инфраструктуры: маршруты формируются с прохождением транзитных вершин и отражают влияние топологии сети на структуру магистральных и распределительных перевозок. Практическая значимость подхода связана с возможностью использовать модель как инструмент анализа пропускной способности логистической системы и построения согласованных решений для двух уровней перевозок в лесопромышленном комплексе. Перспективы развития исследования включают расширение постановки за счёт временных окон, сезонной доступности дорожной сети, стохастического спроса, а также внедрение декомпозиционных и *matheuristic*-подходов для повышения масштабируемости на сетях большой размерности.

Список литературы

1. Scarpati C., Cattaruzza D., Salani M., Vigo D. Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 301. No. 3. Pp. 1035–1056. DOI 10.1016/j.ejor.2022.12.009.
2. Akbay M.A., Blum C., Minuchehr Z., Irastorza J.Á., López-Ibáñez M. A dataset for two-echelon electric vehicle routing problems *Data in Brief*. – 2025. – Vol. 60. – P. 111470. – DOI: 10.1016/j.dib.2025.111470.
3. Crainic T.G., Ricciardi N., Storchi G. The two-echelon vehicle routing problem with pickups, deliveries, and deadlines *Computers and Operations Research*. – 2024. – Vol. 171. – P. 106432. – DOI: 10.1016/j.cor.2024.106432.
4. Artiga Gonzalez A., Mancilla C., Ramirez G. The two-echelon location-routing problem: A comparative analysis of three compact formulations. *Computers and Operations Research*. 2025. Vol. 164. Article 106533. DOI 10.1016/j.cor.2024.106533.
5. Ng M.W., Barichard V., Cung V.D., Speranza M.G. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *International Transactions in Operational Research*. – 2024. – Vol. 31, No. 5. – P. 2847–2918. – DOI: 10.1111/itor.13497.
6. Queiroga E., Subramanian A., Pessoa A. A hybrid matheuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands *Computers & Operations Research*. – 2023. – Vol. 160. – P. 106337. – DOI: 10.1016/j.cor.2023.106337.
7. Accorsi L., Vigo D. Decomposition and set covering strategies for large-scale capacitated vehicle routing problems *Transportation Science*. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – P. 832–856. – DOI: 10.1287/trsc.2023.1214.
8. Fischetti M., Ljubić I., Sinnl M. Benders decomposition without separability: A computational study for capacitated facility location problems *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 310, No. 1. – P. 84–99. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.02.018.
9. Desrosiers J., Lübbecke M.E. Branch-price-and-cut algorithms for the vehicle routing problem with time windows *INFORMS Journal on Computing*. – 2024. – Vol. 36, No. 1. – P. 45–67. – DOI: 10.1287/ijoc.2023.1273.
10. Hu Y. A matheuristic-based multi-objective evolutionary algorithm for flexible assembly job-shop scheduling with carbon emissions consideration *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. – 2024. – Vol. 42. – Art. 100987. – DOI 10.1016/j.suscom.2024.100987.
11. Cheng J. Effective MILP and matheuristic for multi-echelon green closed-loop supply chain network design *Journal of Cleaner Production*. – 2025. – Vol. 434. – Art. 140166. – DOI 10.1016/j.jclepro.2025.140166.
12. Kerscher C. Matheuristics with decomposition for heterogeneous VRP *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*. – 2025. – Vol. 182. – Art. 103456. – DOI 10.1016/j.tre.2025.103456.
13. Raidl G.R., Luby M., Silberman L., Zinterhof A. Speeding up logic-based Benders' decomposition by a metaheuristic for a bi-level capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 292. No. 3. Pp. 945–959. DOI 10.1016/j.ejor.2020.11.016.
14. Boschetti M.A. Matheuristics: survey and synthesis *International Transactions in Operational Research*. – 2023. – Vol. 30, № 5. – P. 2277–2318. – DOI 10.1111/itor.13301.
15. Hijazi M.H.A. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *European Journal of Operational Research*. – 2024. – Vol. 315, № 3. – P. 811–830. – DOI 10.1016/j.ejor.2024.01.015.
16. Cassani G., Righini G. A matheuristic for the two-echelon multi-trip vehicle routing problem. *Transportation Research Part B*. 2023. Vol. 173. Article 102705. DOI 10.1016/j.trb.2023.102705.
17. Gonzalez-Feliu J., Semet F., Routhier J. L. The two-echelon vehicle routing problem with transshipment nodes and occasional drivers. *Discrete Optimization*. 2022. Vol. 47. Article 100686. DOI 10.1016/j.disopt.2022.100686.
18. Cacchiani V., Hemmelmayr V.C., Vigo D. External resource allocation to modular capacitated vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 294. No. 1. Pp. 288–303. DOI 10.1016/j.ejor.2020.12.034.
19. Charaf S. A matheuristic for the two-echelon inventory-routing problem *Computers & Operations Research*. – 2024. – Vol. 169. – Art. 106250. – DOI 10.1016/j.cor.2024.106250.

20. Vesovi G., Tarantino E., Cabras S. New adaptive mechanism for large neighborhood search using dual actor-critic deep reinforcement learning. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 171. Article 106705. DOI 10.1016/j.cor.2024.106705.
21. Henke T., Speranza M.G., Wäscher G. Parallel adaptive large neighborhood search based on Spark to solve the vehicle routing problem on distributed computing environments. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 170. Article 106691. DOI 10.1016/j.cor.2024.106663.
22. Kogler C., Duda K.R., Holzner L., Stampfer K. Empirical insights into salvage wood logistics: Transport, storage and coping strategies *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2024. – Vol. 45, No. 2. – P. 161–177. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.1141.
23. Eriksson M., Holm S., Rönnqvist M. A comprehensive empirical study of the resilience in Austrian wood transport *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2024. – Vol. 187. – P. 103530. – DOI: 10.1016/j.tre.2024.103530.
24. Conrad J.L., Vasic V., Kattenborn T. Overview of global long-distance road transportation of industrial roundwood. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 38. No. 3–4. Pp. 282–298. DOI 10.1080/02827581.2023.2210869.
25. Huber W., Schalicek T., Sternitzke M. Forest supply chains during digitalization: Current implementations and optimization perspectives *Forest Policy and Economics*. – 2023. – Vol. 156. – P. 103152. – DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103152.
26. Liguori G., Holm S., Melin J. Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain. *Forest Policy and Economics*. 2024. Vol. 169. Article 103699. DOI 10.1016/j.forpol.2024.103699.
27. Caliskan E., Köse C., Acuña E. Determination of forest road routes using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 145. Article 102851. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102851.
28. Panevski G., Stojčić M. Sustainable forestry logistics: Using modified A-star algorithm for optimized wood collection routes *Cleaner Logistics and Supply Chain*. – 2024. – Vol. 10. – P. 100152. – DOI: 10.1016/j.clsc.2024.100152.
29. Björkman J., Holm S., Wallman H. Global timber market disruptions and regional supply network adaptation. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 144. Article 102841. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102841.
30. Arlotta R., Cáceres-Cruz J., Soto-García G. Multi-commodity forest routing optimization under uncertainty: A stochastic programming approach *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 311, No. 2. – P. 445–461. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.06.015.
31. SmartForest Norway. *Annual Report on Nordic Forest Digitalization and Precision Wood Supply*. Oslo. University of Life Sciences Publ. 2024.
32. Ryzhkova Y., Volkov A. Sino-Russian sub-regional cooperation in the Far East: International transportation corridors and logistics development. *Geopolitical Review*. 2025. Vol. 28. No. 1. Pp. 42–58.
33. Tonlexing Logistics. *Vladivostok Port: Gateway to Eastern Russia — Infrastructure and Trade Connectivity*. Vladivostok. Tonlexing Logistics Publ. 2025.
34. Caspian Post. *Russia builds new maritime corridor to challenge Western trade dominance: Major investment in Primorsky Krai logistics infrastructure*. 2025.

References

1. Scarpati C., Cattaruzza D., Salani M., Vigo D. Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 301. No. 3. Pp. 1035–1056. DOI 10.1016/j.ejor.2022.12.009.
2. Akbay M.A., Blum C., Minuchehr Z., Irastorza J.Á., López-Ibáñez M. A dataset for two-echelon electric vehicle routing problems *Data in Brief*. – 2025. – Vol. 60. – P. 111470. – DOI: 10.1016/j.dib.2025.111470.
3. Crainic T.G., Ricciardi N., Storchi G. The two-echelon vehicle routing problem with pickups, deliveries, and deadlines *Computers and Operations Research*. – 2024. – Vol. 171. – P. 106432. – DOI: 10.1016/j.cor.2024.106432.

4. Artiga Gonzalez A., Mancilla C., Ramirez G. The two-echelon location-routing problem: A comparative analysis of three compact formulations. *Computers and Operations Research*. 2025. Vol. 164. Article 106533. DOI 10.1016/j.cor.2024.106533.
5. Ng M.W., Barichard V., Cung V.D., Speranza M.G. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *International Transactions in Operational Research*. – 2024. – Vol. 31, No. 5. – P. 2847–2918. – DOI: 10.1111/itor.13497.
6. Queiroga E., Subramanian A., Pessoa A. A hybrid matheuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands *Computers & Operations Research*. – 2023. – Vol. 160. – P. 106337. – DOI: 10.1016/j.cor.2023.106337.
7. Accorsi L., Vigo D. Decomposition and set covering strategies for large-scale capacitated vehicle routing problems *Transportation Science*. – 2024. – Vol. 58, No. 4. – P. 832–856. – DOI: 10.1287/trsc.2023.1214.
8. Fischetti M., Ljubić I., Sinnl M. Benders decomposition without separability: A computational study for capacitated facility location problems *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 310, No. 1. – P. 84–99. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.02.018.
9. Desrosiers J., Lübbecke M.E. Branch-price-and-cut algorithms for the vehicle routing problem with time windows *INFORMS Journal on Computing*. – 2024. – Vol. 36, No. 1. – P. 45–67. – DOI: 10.1287/ijoc.2023.1273.
10. Hu Y. A matheuristic-based multi-objective evolutionary algorithm for flexible assembly job-shop scheduling with carbon emissions consideration *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. – 2024. – Vol. 42. – Art. 100987. – DOI 10.1016/j.suscom.2024.100987.
11. Cheng J. Effective MILP and matheuristic for multi-echelon green closed-loop supply chain network design *Journal of Cleaner Production*. – 2025. – Vol. 434. – Art. 140166. – DOI 10.1016/j.jclepro.2025.140166.
12. Kersch C. Matheuristics with decomposition for heterogeneous VRP *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*. – 2025. – Vol. 182. – Art. 103456. – DOI 10.1016/j.tre.2025.103456.
13. Raidl G.R., Luby M., Silberman L., Zinterhof A. Speeding up logic-based Benders' decomposition by a metaheuristic for a bi-level capacitated vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 292. No. 3. Pp. 945–959. DOI 10.1016/j.ejor.2020.11.016.
14. Boschetti M.A. Matheuristics: survey and synthesis *International Transactions in Operational Research*. – 2023. – Vol. 30, № 5. – P. 2277–2318. – DOI 10.1111/itor.13301.
15. Hijazi M.H.A. A survey of matheuristics for combinatorial optimisation problems *European Journal of Operational Research*. – 2024. – Vol. 315, № 3. – P. 811–830. – DOI 10.1016/j.ejor.2024.01.015.
16. Cassani G., Righini G. A matheuristic for the two-echelon multi-trip vehicle routing problem. *Transportation Research Part B*. 2023. Vol. 173. Article 102705. DOI 10.1016/j.trb.2023.102705.
17. Gonzalez-Feliu J., Semet F., Routhier J. L. The two-echelon vehicle routing problem with transshipment nodes and occasional drivers. *Discrete Optimization*. 2022. Vol. 47. Article 100686. DOI 10.1016/j.disopt.2022.100686.
18. Cacchiani V., Hemmelmayr V.C., Vigo D. External resource allocation to modular capacitated vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 294. No. 1. Pp. 288–303. DOI 10.1016/j.ejor.2020.12.034.
19. Charaf S. A matheuristic for the two-echelon inventory-routing problem *Computers & Operations Research*. – 2024. – Vol. 169. – Art. 106250. – DOI 10.1016/j.cor.2024.106250.
20. Vesovi G., Tarantino E., Cabras S. New adaptive mechanism for large neighborhood search using dual actor-critic deep reinforcement learning. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 171. Article 106705. DOI 10.1016/j.cor.2024.106705.
21. Henke T., Speranza M.G., Wäscher G. Parallel adaptive large neighborhood search based on Spark to solve the vehicle routing problem on distributed computing environments. *Computers and Operations Research*. 2024. Vol. 170. Article 106691. DOI 10.1016/j.cor.2024.106663.

22. Kogler C., Duda K.R., Holzner L., Stampfer K. Empirical insights into salvage wood logistics: Transport, storage and coping strategies *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2024. – Vol. 45, No. 2. – P. 161–177. – DOI: 10.5552/crojfe.2024.1141.
23. Eriksson M., Holm S., Rönqvist M. A comprehensive empirical study of the resilience in Austrian wood transport *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2024. – Vol. 187. – P. 103530. – DOI: 10.1016/j.tre.2024.103530.
24. Conrad J.L., Vasic V., Kattenborn T. Overview of global long-distance road transportation of industrial roundwood. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 38. No. 3–4. Pp. 282–298. DOI 10.1080/02827581.2023.2210869.
25. Huber W., Schalicek T., Sternitzke M. Forest supply chains during digitalization: Current implementations and optimization perspectives *Forest Policy and Economics*. – 2023. – Vol. 156. – P. 103152. – DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103152.
26. Liguori G., Holm S., Melin J. Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain. *Forest Policy and Economics*. 2024. Vol. 169. Article 103699. DOI 10.1016/j.forpol.2024.103699.
27. Caliskan E., Köse C., Acuña E. Determination of forest road routes using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 145. Article 102851. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102851.
28. Panevski G., Stojčić M. Sustainable forestry logistics: Using modified A-star algorithm for optimized wood collection routes *Cleaner Logistics and Supply Chain*. – 2024. – Vol. 10. – P. 100152. – DOI: 10.1016/j.clsc.2024.100152.
29. Björkman J., Holm S., Wallman H. Global timber market disruptions and regional supply network adaptation. *Forest Policy and Economics*. 2022. Vol. 144. Article 102841. DOI 10.1016/j.forpol.2022.102841.
30. Arlotta R., Cáceres-Cruz J., Soto-García G. Multi-commodity forest routing optimization under uncertainty: A stochastic programming approach *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 311, No. 2. – P. 445–461. – DOI: 10.1016/j.ejor.2023.06.015.
31. SmartForest Norway. *Annual Report on Nordic Forest Digitalization and Precision Wood Supply*. Oslo. University of Life Sciences Publ. 2024.
32. Ryzhkova Y., Volkov A. Sino-Russian sub-regional cooperation in the Far East: International transportation corridors and logistics development. *Geopolitical Review*. 2025. Vol. 28. No. 1. Pp. 42–58.
33. Tonlexing Logistics. *Vladivostok Port: Gateway to Eastern Russia — Infrastructure and Trade Connectivity*. Vladivostok. Tonlexing Logistics Publ. 2025.
34. Caspian Post. *Russia builds new maritime corridor to challenge Western trade dominance: Major investment in Primorsky Krai logistics infrastructure*. 2025.

Сведения об авторе

Рогулин Родион Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры математики и моделирования ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», ул. Гоголя, д. 41, г. Владивосток, Российская Федерация, 690014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>, e-mail: rafassiaofusa@mail.ru.

Information about the author

Rodion S. Rogulin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41 Gogolya St., Vladivostok, Russian Federation, 690014; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>, e-mail: rafassiaofusa@mail.ru.



Оценка динамической нагруженности и надежности механизма подъема стрелы манипулятора лесотранспортной машины с пневмогидравлическим демпфирующим устройством на стадии проектирования

Ирина В. Четверикова¹✉, chivles@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9726-3218>

Алина В. Попикова¹, poalinka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Роман Г. Боровиков¹, borovikov_roman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>

Сергей В. Зимарин¹, teacherdo58@vglta.vrn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>

Сергей К. Попиков¹, sergpopikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

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

Анализ исследований рабочих процессов манипуляторов технологических машин показали недостаточную надежность металлоконструкций и элементов гидропривода. Одним из способов повышения надежности лесных машин манипуляторного типа является снижение динамических нагрузок за счет применения различных демпфирующих устройств. Целью исследования является снижения динамической нагруженности и повышение надежности механизма подъема стрелы гидроманипулятора лесотранспортной машины. Авторами предлагается новый грузоподъемный механизм стрелы с пневмогидравлическим демпфирующим устройством, включающий пневмогидроаккумулятор и демпфер плунжерного типа, защищенный патентами на изобретение и полезную модель. Разработана математическая модель грузоподъемного механизма лесного манипулятора с пневмогидравлическим демпфирующим устройством, которая включает три уравнения: уравнение вращательного движения стрелы, уравнение расхода рабочей жидкости, включая расход пневмогидроаккумулятора, и уравнение движения плунжера демпфера. Решение задачи найдено при разложении функции в ряд Маклорена. По конечным формулам получены графики давления рабочей жидкости и рассчитаны коэффициенты динамичности без подключения пневмогидроаккумулятора составят 1,65, а с подключением 1,35, т.е. снижение динамической нагруженности на 18,5%. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном стенде с серийным лесным гидроманипулятором ЛВ-210-01 по методу полнофакторного эксперимента. В результате обработки полученных осциллограмм получены статистические характеристики давления рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра привода стрелы для различных вылетов стрелы и диаметров дросселей демпфера без подключения пневмогидроаккумулятора и с подключением. Установлено, что без подключения пневмогидроаккумулятора средний коэффициент динамичности равен 1,55, а с подключением средний коэффициент динамичности равен 1,32, т.е. снижение по экспериментальным данным происходит на 23 %, расхождение с теоретическими на 4,5%. Расчет зависимости вероятностного коэффициента безопасности γ от времени эксплуатации лесного гидроманипулятора ЛВ-210-01 показал, что без подключения пневмогидроаккумулятора допустимое значение коэффициента безопасности (1,5-2,0) достигается через 15 лет, в то время как с подключением пневмогидроаккумулятора в демпфирующее устройство позволяет продлить срок эксплуатации свыше 20 лет. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки динамической нагруженности и надежности манипуляторов лесных машин на стадии проектирования и могут быть использованы в проектных организациях лесного машиностроения.

Ключевые слова: гидроманипулятор, стрела, демпфер, гидропривод, пневмогидроаккумулятор, надежность, динамическая нагруженность

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Авторы выражают признательность рецензентам за обстоятельный анализ материалов статьи и ценные критические замечания, и главному редактору ЛТЖ Яковенко Н.В. за оказание методической помощи при написании данной статьи.

Конфликт интересов: авторы данной статьи заявили об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке, написании и публикации данной статьи.

Для цитирования: Оценка динамической нагруженности и надежности механизма подъема стрелы манипулятора лесотранспортной машины с пневмогидравлическим демпфирующим устройством на стадии проектирования / И. В. Четверикова, А. В. Попикова, Р. Г. Боровиков, С. В. Зимарин, С. К. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 209–228. – Библиогр.: с. 225–228 (20 назв.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/14>.

Поступила 12.10.2026. Пересмотрена 08.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Article

Assessment of the dynamic load and reliability of the boom lifting mechanism of a logging machine with a pneumohydraulic damping device at the design stage

Irina V. Chetverikova¹✉,  chivles@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9726-3218>

Alina V. Popikova¹, poalinka@mail.ru,  poalinka@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Roman G. Borovikov¹, borovikov_roman@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>

Sergey V. Zimarin¹, teacherdo58@vglta.vrn.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>

Sergey K. Popikov¹, sergpopikov@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

¹*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov", st. Timiryazeva St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

An analysis of the work processes of manipulators of technological machines has shown insufficient reliability of metal structures and hydraulic drive elements. One of the ways to increase the reliability of manipulator-type forest machines is to reduce dynamic loads through the use of various damping devices. The aim of the study is to reduce the dynamic load and increase the reliability of the boom lifting mechanism of the hydraulic manipulator of the timber transport machine. The authors propose a new boom lifting mechanism with a pneumohydraulic damping device, including a pneumohydroaccumulator and a plunger-type damper, protected by patents for invention and utility model. A mathematical model of the lifting mechanism of a forest manipulator with a pneumohydraulic damping device has been developed, which includes three equations: the equation of rotational motion of the boom, the equation of the flow rate of the working fluid, including the flow rate of the pneumatic accumulator, and the equation of motion of the damper plunger. The solution to the problem is found by decomposing the function into a Maclaurin series. Using the final formulas, pressure graphs of the working fluid were obtained and the dynamic coefficients were calculated without connecting the pneumatic accumulator to 1.65, and with 1.35 connection, i.e. a decrease in dynamic load by 18.5%. Experimental studies were carried out on a laboratory stand with a serial LV-210-01 forest hydraulic manipulator using the method of a full-factor experiment. As a result of processing the obtained waveforms, statistical characteristics of the

pressure of the working fluid in the piston cavity of the boom drive hydraulic cylinder for various boom spans and damper choke diameters were obtained without inflating the pneumatic accumulator and with connection. It was found that without the connection of a pneumatic accumulator, the average coefficient of dynamism is 1.55, and with the connection, the average coefficient of dynamism is 1.32, i.e., according to experimental data, a decrease occurs by 23%, a discrepancy with theoretical by 4.5%. The calculation of the dependence of the probabilistic safety coefficient γ on the operating time of the LV-210-01 forest hydraulic manipulator showed that without connecting a pneumatic hydraulic accumulator, the permissible value of the safety coefficient (1.5-2.0) is reached in 15 years, while with the connection of a pneumatic hydraulic accumulator in a damping device, it allows extending the service life over 20 years. The results obtained are of practical importance for assessing the dynamic load and reliability of manipulators of forest machines at the design stage and can be used in design organizations of the forestry engineering.

Keywords: *hydraulic manipulator; boom, damper; hydraulic drive, pneumatic-hydraulic accumulator, reliability, dynamic loading*

Funding: This study did not receive external funding.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their thorough analysis of the article materials and valuable critical comments, and to the Editor-in-Chief of LTZh, N.V. Yakovenko. for providing methodological assistance in writing this article.

Conflict of interest: the authors of this article declare no personal, commercial, ideological, or intellectual conflicts of interest in the preparation, writing, and publication of this article.

For citation: Chetverikova I. V., Popikova A. V., Borovikov R. G., Zimarin S. V., Popikov S. K. (2026). Assessment of the dynamic load and reliability of the boom lifting mechanism of a logging machine with a pneumohydraulic damping device at the design stage. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 209–228 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/14>.

Received 12.10.2025. Revised 08.02.2026. Accepted 15.03.2026. Published online 27.03.2026.

Введение

Для повышения технико-экономической эффективности рабочих процессов лесных машин при сортиментной лесозаготовке необходимо повышать показатели эксплуатационной надежности, т.к. лесосечные машины работают в труднодоступных местах вдали от ремонтных и сервисных подразделений, и любая поломка приводит к значительным экономическим потерям. Самый большой недостаток существующих гидроприводов манипуляторов - гидроудар, возникающий в момент смены режимов подъема. Именно в момент гидроудара повышается динамическая нагруженность гидропривода и снижается надежность грузоподъемного механизма. Поэтому исследование вопросов снижения динамической нагруженности и повышения надежности грузоподъемного механизма машин манипуляторного типа, способов гашения всплесков давления, является актуальной задачей проводимых

исследований в целях увеличения срока службы манипуляторов и повышения их технического уровня.

Опыт эксплуатации лесных машин показывает, что все отказы в основном происходят из-за ошибок при проектировании, изготовлении и эксплуатации и их можно подразделить на отказы гидросистем и отказы металлоконструкций. Наименее надежными элементами гидропривода являются рукава высокого давления (65 % от общего количества отказов по гидроприводу). Отказы металлоконструкции подразделяются на несколько видов: остаточная деформация, вязкий, усталостный и хрупкий изломы, которые вызваны динамическими и циклическими нагрузками. Выход из строя рукавов высокого давления и дорогостоящих металлоконструкций технологического оборудования приводят к аварийным ситуациям с человеческими жертвами, загрязнению окружающей среды при потере рабочей жидкости и к лесным пожарам.

Нами проведен детальный анализ исследований по основным направлениям снижения динамической нагруженности и повышения надежности технологических машин манипуляторного типа.

А) Анализ исследований, посвященных динамике гидропривода лесных манипуляторов

Е.А. Памфилов и др. 2021 [1] отмечают необходимость повышения эффективности заготовки древесины с помощью машин манипуляторного типа. В настоящее время лесопромышленные предприятия вынуждены закупать зарубежные харвестеры и форвардеры, стоимость которых значительно превышает стоимость отечественных лесозаготовительных машин. Поэтому необходимо разрабатывать рекомендации для производства отечественной лесозаготовительной техники, которая должна быть конкурентноспособной. В настоящее время в РФ на машиностроительных заводах ОАО «Майкопский машиностроительный завод», Великолукский машиностроительный завод ООО «Велмаш-С» выпускаются серийные гидроманипуляторы, которые устанавливаются на грузовые автомобили КамАЗ, Урал, МАЗ, КрАЗ и автомобили других производителей. Гидроманипулятор МАЙМАН-100S (ММ-100) представлен на рисунке 1 с грузовым моментом 100 кН·м и максимальным вылетом 7,8 м. Гидросистема оснащена демпфером механизма поворота колонны, уменьшающим динамические нагрузки при повороте и остановке колонны в промежуточных положениях, двухреечным механизмом поворота гидроманипулятора для увеличения момента поворота с грузом. Для изготовления металлоконструкций гидроманипуляторов применяется высокопрочная сталь S500 с пределом текучести, в 1,4 раза превышающим аналогичный показатель для стали 09Г2С, что дает возможность увеличить прочность и снизить массу металлоконструкции на 400–500 кг. металлоконструкции на 400–500 кг.



Рисунок 1. Манипулятор МАЙМАН-100S

Figure 1. The MAIMAN-100S manipulator

Источник:

<https://gruzovik.biz/miass/item/226303-lesovoz-s-kmu-ural-55571-60m>

Source: <https://gruzovik.biz/miass/item/226303-lesovoz-s-kmu-ural-55571-60m>

А.Т. Рыбак и др. 2023 [2] отмечает, что применение энергосберегающего гидропривода с демпфирующим устройством на лесозаготовительном манипуляторе позволяет снизить пиковое давление в гидравлической линии поршневой полости гидроцилиндра во время переходных режимов на 37–45 %, а энергопотребление — на 10–15 %. Таким образом, снижение динамической нагрузки и энергоёмкости рабочих процессов стрелового подъёмного механизма лесозаготовительного манипулятора за счёт обоснования параметров энергосберегающего гидропривода может повысить эффективность работы манипулятора и сократить время простоя из-за ремонта гидравлического оборудования.

И.Д. Евсиков и др. 2023 [3] провели модельную оценку динамики коэффициента податливости гибких элементов гидропривода при повороте стрелы лесного манипулятора. Задача решалась в рамках работы над программным комплексом для исследований скачков давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах. Результаты оценки показали, что в вычислительном эксперименте при проектных расчетах можно не учитывать влияние на изменение давления коэффициент податливости K_p гибких элементов гидропривода при повороте стрелы лесного манипулятора, поскольку этот коэффициент примерно на двенадцать порядков меньше, чем давление рабочей жидкости.

Лесотехнический журнал 1/2026

В.И. Посметьев и др. 2024 [4] отмечают, что при использовании гидравлического манипулятора, оснащенного предлагаемым кривошипным приводом, длина стрелы которого составляет в среднем 6 м, а масса перемещаемых лесоматериалов 600 кг, количество энергии, которое можно накопить в пневмогидравлическом аккумуляторе составляет около 1300 Дж. Угловая неравномерность показателей кривошипного привода составляет 23,6 % и 4,6 % при оценке по показателям рекуперированной энергии и амплитуды раскачивания груза соответственно. Для типичного гидравлического манипулятора с длиной стрелы 6 м при торможении поворота колонны система рекуперации позволяет запасти от 0,39 до 2,59 кВт при массе груза соответственно от 200 до 1400 кг, при приемлемой амплитуде раскачивания груза соответственно от 0,2 до 0,48 м. Полученные результаты будут использованы в качестве рекомендаций с целью доработки предлагаемого кривошипного привода поворотного устройства лесного гидравлического манипулятора на стадии его проектирования.

С.А. Голякевич и др. 2024 [5] разработали авторскую математическую модель комбинированного-шарнирно-рычажного манипулятора с телескопическим звеном, которая описывает кинематику и динамику металлоконструкций многозвенных манипуляторов, наиболее распространенных в лесозаготовительной отрасли. Научной новизной модели является возможность интеграции в общую модель лесозаготовительной машины и возможность управления манипулятором в режиме «реального времени». Данные, полученные с помощью математической модели, используются при прогнозировании эффективности комплексов многооперационных лесозаготовительных машин, реализующих технологические процессы заготовки сортиментов в различных условиях эксплуатации.

Т.А. Хиникадзе и др. 2021 [6], предлагают устройство, оснащённое гидроприводом с самоадаптацией по нагрузке и согласованием кинематических и силовых параметров главного движения и движения подачи рабочего органа технологической машины. Для исследования и

проектирования устройства на основе методов математического моделирования гидропривода и адаптивных систем предложена математическая модель, разработанная с использованием основ теории объёмной жёсткости гидравлических систем. Это позволяет максимально точно описать влияние динамических свойств гидравлической системы (сжимаемость рабочей жидкости, упругие свойства трубопроводов, рукавов высокого давления, гидравлических аппаратов) на динамические свойства системы в целом.

Б) Анализ исследований зарубежных авторов по динамике гидропривода технологических машин

Li Lan и др. 2021 [7] представили новую нелинейную модель и высокоточный метод управления движением подъёма гидравлического манипулятора с пропорциональным клапаном, учитывающие серьёзные нелинейности системы, различные неопределённости, а также нелинейности, связанные с люфтом и мёртвым ходом клапана. Для решения этой задачи на основе процесса независимого дросселирования в отверстии клапана предлагается новая комплексная модель давления и расхода, которая позволяет одновременно учитывать влияние люфта и мёртвого хода на характеристики потока. Кроме того, для описания динамики подъёма манипулятора с учётом нелинейности механизма и использования модели трения Лугре для описания динамики трения была создана нелинейная математическая модель гидравлической системы манипулирования в пространстве состояний. Полученные характеристики слежения, обеспечиваемые разработанным законом управления, подтверждаются результатами сравнительного моделирования.

К.Ј. Jensen и др. 2021 [8] отмечают, что автономные гидравлические цилиндры приобрели популярность в последние годы, но до сих пор не использовались в мощных шарнирно-сочленённых гидравлических манипуляторах. В этой статье представлена новая концепция электрогидростатического привода, применённого в крупных гидравлических манипуляторах. Привод спроектирован и проанализирован на соответствие таким требованиям, как удержание нагрузки, работа

с перегрузками и компенсация дифференциального расхода. Система проанализирована в ходе работы в четырёх квадрантах для изучения энергоэффективности и возможностей рекуперации. Для иллюстрации реального сценария было проведено численное моделирование с использованием управления траекторией и предотвращения раскачивания гидравлического крана с двумя степенями свободы. Было проведено сравнение с традиционными приводами с клапанным управлением, которое показало значительно более высокую эффективность при схожей динамике, а также возможность рекуперации энергии.

G.R. Petrovic и др. [9] предлагают новый подход к моделированию сверхмощного манипулятора с параллельными и последовательными структурами. Последовательная структура содержит вращающийся сегмент с жёсткими звеньями, соединёнными пассивным вращающимся шарниром и приводимыми в действие линейным гидравлическим приводом, что образует замкнутый кинематический контур. Кроме того, рассматриваются призматические сегменты, состоящие из призматических шарниров, приводимых в действие линейными гидравлическими приводами. Выражения для сил, создаваемых приводами, получены с использованием закона Ньютона –Эйлера. В процессе вывода не предполагается, что безмассовые приводы не связаны со звеньями манипулятора, как это обычно бывает при формулировке динамики Лагранжа. В анализ включена динамика давления в приводе, что в итоге приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений третьего порядка. Предложенная модель с меньшим количеством параметров, чем у её предшественников, позволяет пересмотреть системный процесс управления виртуальной декомпозицией и сформулировать закон управления на основе новой модели.

Y. Xia и др. 2022 [10] отмечают, что гидравлические манипуляторы играют незаменимую роль во многих сферах применения, где требуется высокая производительность. В

настоящее время к гидравлическим манипуляторам предъявляются более высокие требования в отношении точности, а также силы/мощности. Однако из-за присущих им нелинейных свойств динамики высокого порядка точность манипуляторов часто оказывается ниже, чем у манипуляторов с электрическим приводом. Поэтому в данной статье предлагается нелинейный адаптивный метод робастного управления гидравлическим манипулятором. Чтобы сделать контроллер более применимым в практических инженерных проектах, в этом исследовании была предпринята попытка управлять каждым звеном независимо, а не напрямую, на основе сложной многостепенной динамики высокого порядка, при этом гарантируя точность управления за счёт адаптивной компенсации нелинейной модели, а также надёжной обратной связи. Эффективность управления с обратной связью была теоретически подтверждена. Кроме того, было проведено несколько сравнительных экспериментов по отслеживанию движения, и предложенная система с обратной связью показала высокую точность при различных траекториях и положениях.

J. Nan и др. 2023 [11] отмечают, что обратная связь по давлению является эффективным методом активного демпфирования и снижения колебаний в гидравлических системах. Однако это исследование выявило проблему динамического воздействия, которая заключается в увеличении перерегулирования скорости и замедлении сходимости при воздействии внешней силы или крутящего момента после введения обратной связи по давлению для активного демпфирования. Эта проблема была выявлена с помощью теоретического анализа, а затем проиллюстрирована с помощью численного моделирования. Решения этой проблемы были проанализированы для гидравлической системы с симметричным цилиндром. Для достижения компромисса между эффектом активного демпфирования и снижением динамического воздействия предлагается метод многокритериальной оптимизации для определения управляющих параметров (коэффициента усиления и постоянной времени) фильтра высоких частот. Метод многокритериальной оптимизации проверен

с помощью имитационной модели с симметричным цилиндром при различных возмущениях.

М. Kim и др. 2021 [12] отмечают, что гидравлические манипуляторы обладают значительным потенциалом для применения в различных областях благодаря своим преимуществам. Для моделирования сценариев и эффективной оценки эффективности управления гидравлическими манипуляторами требуется метод моделирования в реальном времени. Моделирование проще и безопаснее, поэтому его предпочитают физическим экспериментам. В этой статье рассматривается симулятор гидравлических манипуляторов, работающий в режиме реального времени. Этот симулятор включает в себя динамику сервоклапанов, гидравлические уравнения, модель трения, модель резки труб, динамику механического манипулятора, надёжный алгоритм численного интегрирования и контроллер. Динамика гидравлического манипулятора была разработана с учётом сжимаемости жидкости и применения рекурсивной формулы для нескольких тел, что позволило эффективно реализовать характеристики реальной системы.

M.J Łopatka и др. 2022 [13] отмечают, что эффективное использование роботизированных манипуляторов особенно важно при выполнении опасных задач. Часто для таких задач используются манипуляторы с гидравлическим приводом, и их работа заключается в первую очередь в выполнении точных движений с помощью эффекторов. В тяжёлых манипуляторах ограничение неконтролируемых движений, вызванных высокой инерцией и относительно низкой жёсткостью, влияет на повышение точности управления. Таким образом, в статье представлены экспериментальные исследования, позволяющие оценить влияние использования пропорциональных клапанов на точность и динамику манипулятора с гидростатической системой привода.

В) Анализ исследований по методам оценки прочности и надёжности (усталость, моделирование в ANSYS)

Г.В. Селиверстов и др. [14] провели исследования применения фиброармированных полимерных материалов в металлических

конструкциях при восстановлении прочности на растяжение при повреждениях коррозией, а также увеличения изгибной и усталостной прочности, показали, что средняя фактическая несущая способность образцов до усиления составила 18,1 кН, а после усиления волокном – 24,1 кН, т.е. несущая способность образцов увеличилась на 33%.

А.П. Мохирев и др. 2022 [15] провели исследования эксплуатационной надёжности путем наблюдений за работой харвестера Ponsse-ERGO и зимнее время в течение 10500 часов в Красноярском крае.

На основании исследований построена диаграмма Парето, которая показывает накопленную вероятность отказов систем. Установлено, что на долю гидропривода приходится 60% отказов по машине, на металлоконструкции 15%.

К. Брайан и др. 2025 [16] отмечают, что проведенный обзор статей показал, что в 81 % статей упоминается модель износа Арчарда, в которой твёрдость материала является основным фактором, влияющим на величину износа. с трудом позволяют делать физически обоснованные или точные прогнозы. Несмотря на то, что модель Арчарда по-прежнему актуальна для определения объёма износа в зависимости от приложенной нагрузки и скорости скольжения, её зависимость от постоянного коэффициента износа и твёрдости материала не позволяет всесторонне описать процесс износа. Для повышения точности прогнозирования износа необходимо усовершенствовать модель с помощью механики. В этом обзоре рассматриваются многие металлы (например, сталь, титан, магний и циркониевые сплавы), основное внимание уделяется подшипниковым сталям (например, AISI 52100, 100Cr6, SUJ2, GCR15 или EN31), которые отличаются более высоким содержанием углерода и мартенситной микроструктурой и известны своей прочностью, твёрдостью и усталостной стойкостью.

По данным Erişir E. и др. [17] подшипниковые стали (AISI 52100, 100Cr6, SUJ2, GCR15) особенно хорошо подходят для применения в аэрокосмической, автомобильной, железнодорожной, энергетической отраслях и т. д.

Хотя компоненты подшипников качения в основном подвергаются контакту при качении между телами качения и дорожками качения, могут возникать и скользящие поверхности, подверженные износу при скольжении, например, контакт между телами качения и сепараторами или торцами фланцев колец.

М. Чжан и др. [18] провели всесторонний анализ классических моделей и современных симуляций износа. В их обзоре классических моделей особое внимание уделяется модели Арчарда, и они критикуют эту знаменитую модель за то, что она просто не может отразить истинную природу данных об износе, в отличие от других эмпирических моделей. Они возражают против необходимости экспериментального определения коэффициента пропорциональности k . Кроме того, простая линейная зависимость в уравнении между объёмом износа и приложенной нагрузкой недостаточно для моделирования экспериментальных данных, однако эта модель остаётся одной из лучших для прогнозирования износа.

Долженко и др. 2021 [19] отмечают, что материалы металлоконструкций существенно влияют на его механические свойства, определяя движение, взаимодействие и накопление дислокаций во время деформации. По мере деформации изменение плотности дислокаций служит важнейшим индикатором микроструктурных изменений, происходящих при различных условиях нагружения, и отражает как деформационное упрочнение, так и разупрочнение. Это изменение неразрывно связано с взаимодействием между скоростью деформации и температурой. Более высокие температуры повышают подвижность дислокаций, способствуя процессам динамического восстановления и рекристаллизации, которые могут снизить плотность дислокаций Сальвини и др. 2024 [20] было изучено влияние кристаллографической ориентации на рост пустот в поликристаллических материалах. Они разработали комплексную модель пластичности кристаллов и фазовых повреждений для изучения влияния разориентации границ зёрен и выделения карбидов на зарождение повреждений в нержавеющей стали. Однако во всех

вышеперечисленных исследованиях изучалось влияние кристаллографической ориентации на основе распределения случайных ориентаций зёрен.

Проведенный анализ литературных источников показал, что основным недостатком существующих гидроприводов манипуляторов является то, что в моменты смены режимов подъема груза возникает гидроудар, который повышает динамическую нагруженность гидропривода и снижает надежность грузоподъемного механизма. Одним из способов повышения надежности технологического оборудования лесных машин манипуляторного типа является снижение динамических нагрузок за счет применения различных демпфирующих устройств.

Целью исследования является оценка влияния нового пневмогидравлического демпфирующего устройства на динамическую нагруженность и надежность механизма подъема стрелы манипулятора лесотранспортной машины.

Материалы и методы

Нами предлагается новый механизм подъема стрелы манипулятора лесотранспортной машины, оснащенный пневмогидравлическим демпфирующим устройством, защищенный патентами на изобретение №2841796 и полезную модель № 234950. Гидросистема, согласно с полезной моделью, включает гидробак 1 (рисунок 2), насос 2, распределителя 3, гидроцилиндра 4, привода грузоподъемной стрелы с подводящим 5 и отводящим 6 трубопроводами, соединенными между собой трубопроводом 7, в который подключен пневмогидроаккумулятор 15 через обратные клапаны 8 и 10, а также подключен нормально закрытый управляемый клапан 12 с линией управления 13. В отводящий трубопровод установлен управляемый клапан 9, параллельно которому подключен трубопровод с обратным клапаном 11. Управляемый клапан 9 снабжен линией управления 14. К подводящему 5 и отводящему 6 трубопроводам подключен демпфер 16, через обратные клапаны 17 и 18, в корпусе которого размещен пустотелый плунжер 19, подпружиненный с двух концов пружинами сжатия 20 и 21. Левая полость 22 демпфера соединяется с

гидролинией 5 через канал и регулируемый дроссель 23, а правая полость 24 демпфера соединена с гидролинией 6 через канал и регулируемый дроссель 25. В корпусе демпфера 16 установлены резьбовые пробки 26 и 27, с регулировочными шайбами 28 и 29. На сливной гидролинии установлен фильтр 30. Таким образом, пневмогидравлическое демпфирующее устройство включает пневмогидроаккумулятор 15 и демпфер 16. При работе в обычном режиме погрузки лесоматериалов (сортиментов) из штабеля в кузов автомобиля при подъеме захвата, загруженного сортиментами, рабочая жидкость подается из бака 1 насосом 2 в гидрораспределитель 3, который направляет по трубопроводу 5 в поршневую полость гидроцилиндра 4 и рабочая жидкость под высоким давлением 16 МПа воздействует на поршень, который жестко соединен со штоком, который выдвигается и поднимает стрелу с грузом на заданную высоту и потом поворачивается вместе с колонной и захват разгружается в кузов автомобиля лесовоза (рисунок 3).

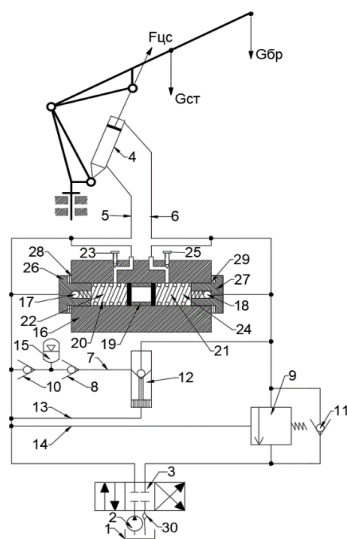


Рисунок 2. Гидрокинематическая схема гидропривода грузоподъемного механизма с пневмогидравлическим демпфирующим устройством (патент на полезную модель № 234950)

Figure 2. Hydrokinematic scheme of hydraulic drive of a lifting mechanism with a pneumohydraulic damping device (utility model patent № 234950)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

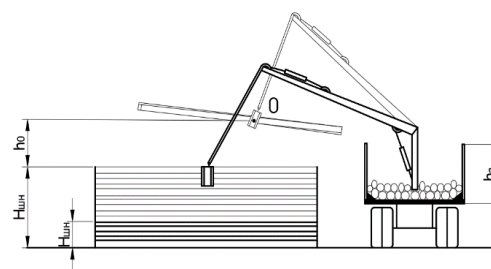


Рисунок 3. Схема погрузки лесоматериалов (сортиментов) из штабеля в кузов автомобиля-лесовоза

Figure 3. Loading scheme for timber (sortiments) from a stack into a logging truck

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

После разгрузки захвата совершается холостой ход манипулятора, при котором клапан 9 автоматически закрывается, и рабочая жидкость из штоковой полости гидроцилиндра 4 поступает по трубопроводу 7 с клапанами 8 и 12 в его поршневую полость, обеспечивая ускоренный подъем стрелы и повышение производительности. Однако в момент закрытия клапана 9 и смене режимов с обычного на ускоренный возникает гидроудар, в результате которого часть рабочей жидкости подается в пневмогидроаккумулятор 15, который при этом гасит гидроудар и снижает динамическую нагруженность механизма подъема стрелы. В ускоренном режиме происходит также подъем легких грузов при не полностью загруженном захвате тонкомерными сортиментами.

Для исследования процесса погрузочно-разгрузочных работ лесного манипулятора составлены расчетные схемы механизма подъема стрелы (рисунок 4) и демпфера (рисунок 5).

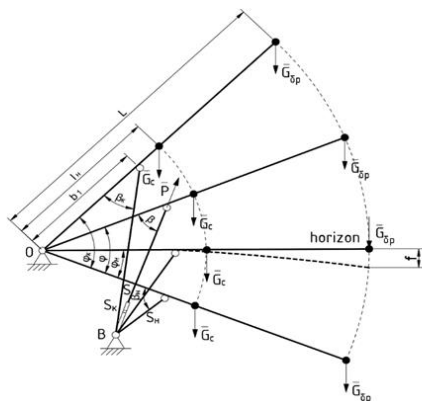


Рисунок 4. Расчетная схема механизма подъема стрелы манипулятора

Figure 4. Design scheme of the manipulator arm lifting mechanism

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

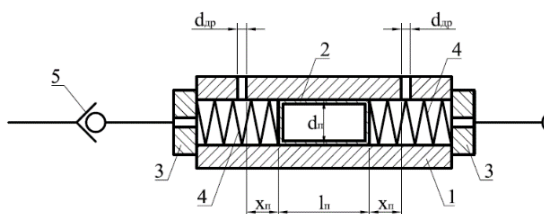


Рисунок 5. Расчетная схема демпфера в гидроприводе механизма подъема стрелы. 1 – корпус; 2 – плунжер; 3 – крышка; 4 – пружина; 5 – обратный клапан

Figure 5. Design scheme of the damper in the hydraulic drive of the boom lifting mechanism. 1 – housing; 2 – plunger; 3 – cover; 4 – spring; 5 – check valve

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Разработана математическая модель грузоподъемного механизма лесного манипулятора с пневмогидравлическим демпфирующим устройством для ускоренного режима как более нагруженного и недостаточно исследованного. Математическая модель (1) включает в себя три уравнения: уравнение вращательного движения стрелы относительно точки О (рисунок 4),

уравнение расхода рабочей жидкости, включая расход пневмогидроаккумулятора, и уравнение движения плунжера демпфера (рисунок 5), где:

$J_{бр}$ – момент инерции пачки бревен относительно точки О1, кгм²;

J_c – момент инерции стреловой группы манипулятора относительно точки О1, кг·м²;

$G_{бр}$ – сила тяжести пачки бревен в захвате, Н;

G_c – сила тяжести стреловой группы манипулятора, Н;

q_n – рабочий объем насоса, м³/об;

n_n – частота вращения насоса, об/с;

p – текущее значение давления в гидроприводе, Па;

a_y – коэффициент, учитывающий утечки жидкости, м⁵/(Н·с);

K_p – коэффициент податливости гидропривода (определяется по эмпирической формуле, м⁵/(Н·с);

d_c – внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м;

$d_п$ – диаметр плунжера демпфера, м;

$x_п$ – ход плунжера демпфера, м;

$m_п$ – масса плунжера демпфера, кг;

$k_п$ – коэффициент трения плунжера демпфера;

ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

$c_п$ – жёсткость пружины демпфера, Н/м;

C_1, C_2 – жесткости участков металлоконструкции стрелы, Н/м;

E – модуль упругости стрелы, Н/см²;

J – момент инерции поперечного сечения стрелы под проушиной гидроцилиндра, м⁴.

Результаты и обсуждение

Решение задачи найдем, разложив функции в ряд Маклорена, ограничившись второй степенью переменной t для $p(t)$ и $x_d(t)$ и первой степенью t для $\varphi(t)$. Вычисления приводят к следующему результату.

$$\left\{ \begin{aligned} (J_{6p} + J_c) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= \frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} p - (G_{6p} L + G_c l_H) \cos(\varphi - \varphi_H) - \frac{0,75 G_{6p} E J}{C_1 (L - b_1)^2 \cos^2 \varphi} - \frac{0,5 G_c E J}{C_2 (l_H - b_1) \left[(L - b_1) - \frac{(l_H - b_1)}{3} \right] \cos \varphi}, \\ q_H n_H &= \left[\frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} + \frac{\pi (2d_c^2 + d_{шт}^2) b_1 \sin \beta}{4} \right] \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\pi d_H^2}{4} \frac{dx_H}{dt} + k_{ак} \sqrt{|p - P_A|} a_y p + K_p \cdot \frac{dp}{dt}, \\ m \frac{d^2 x_H}{dt^2} &= \frac{\pi d_H^2}{4} \cdot \left[p - \frac{d_H^2 \rho}{2 \mu^2 d_{дп}^4} \cdot \left(\frac{dx_H}{dt} \right) \right] - c_x x_H - k \frac{dx_H}{dt}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

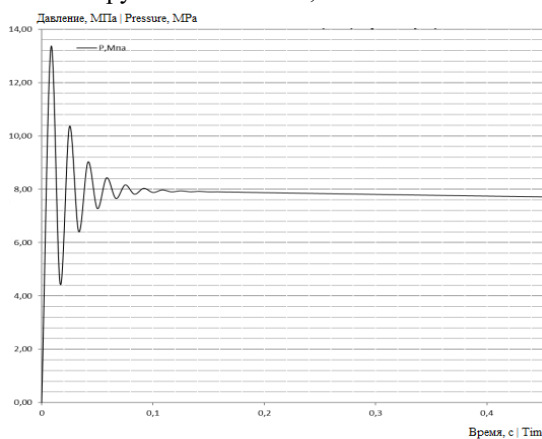
$$p(t) \approx p(0) + tp'(0) + \frac{t^2}{2} \cdot$$

$$\left(-C_r a_y p'(0) - \frac{\pi^2 C_r d_c^4 b_1^2 \sin^2 \beta}{16 (J_{6p} + J_c)} p(0) + \frac{\pi d_c^2 b_1 C_r \sin \beta}{4 (J_{6p} + J_c)} \left[G_{6p} L + G_c l_H + \frac{G_{6p} C_{ст} (L - b_1)^4}{3 E J} \right] \cos(\varphi(0)) \right) - \frac{\pi \mu C_r d_{дп}^2 \sqrt{2}}{8 \sqrt{\rho}} \cdot \frac{p'(0)}{\sqrt{p(0)}} \right),$$

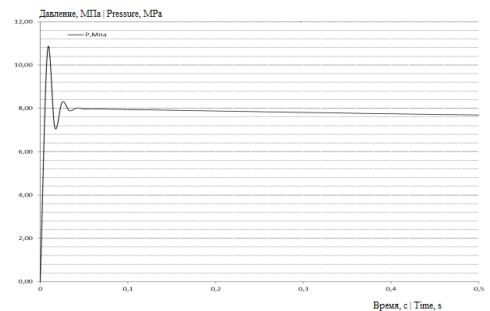
$$\varphi(t) \approx \varphi(0) + t\varphi'(0), \quad (2)$$

$$x_d(t) \approx x_d(0) + tx_d'(0) + \frac{t^2}{2} \left(-\frac{k_d}{m_d} x_d'(0) + \frac{\pi d_H^2}{4 m_d} p(0) - \frac{c_H}{m_d} x_d(0) \right). \quad (3)$$

По конечным формулам (2-5) построены графики зависимостей переменных параметров математической модели от времени. На рисунок 6 приведены графики давления рабочей жидкости, из которых видно, что давление рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра без пневмогидроаккумулятора достигает 13,2 МПа, коэффициент динамичности 1,65, а с пневмогидроаккумулятором 10,8 МПа, коэффициент динамичности 1,35, т.е. снижение динамической нагруженности на 18,5%.



а)



б)

Рисунок 6. Теоретические графики зависимостей давления рабочей жидкости от времени для ЛВ-210-01 (а) без демпфера, б) с демпфером)

Figure 6. Theoretical graphs of the working fluid pressure versus time for LV-210 (a) without a damper b) with a damper (b))

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Для проведения лабораторных исследований использовался серийный манипулятор ЛВ-210-01 Майкопского машиностроительного завода со следующими параметрами:

- грузовой момент 35 кН·м;
- максимальный вылет 2,72 м;
- максимальная высота подъёма 4,8 м;
- максимальная глубина опускания 2 м;
- угол поворота стрелы 80°;
- номинальное давление 20 МПа;

- номинальный расход 26 л/мин;
- гидрораспределитель Badestnost 5–408.

Гидропривод стандового манипулятора (рисунок 7) состоит из насосной станции 1 с насосом НШ-32 с приводом от асинхронного электродвигателя мощностью 11 кВт и частотой вращения 1450 об/мин, а также маслобак емкостью 45 литров, гидрораспределителя 2 марки Р-75, гидроцилиндра 3 привода стрелы 4, гидроцилиндра 5 привода удлинителя 6, гидроцилиндров 7 привода механизма поворота колонны 8, пневмогидравлический аккумулятор 9 с рабочим объемом 5 литров, демпфера 10, с дросселями 11 и 12, тензометрический датчик давления 13.

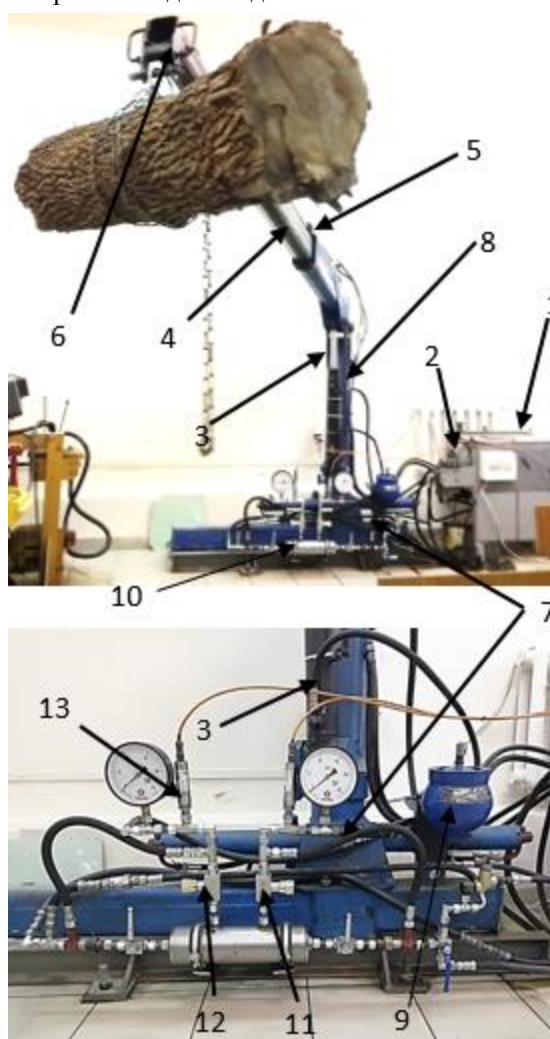


Рисунок 7. Установка пневмогидравлического демпфирующего устройства на серийном манипуляторе ЛВ-210-01
Figure 7. Installation of a pneumohydraulic damping device on a laboratory bench

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Лабораторные исследования проводились с применением метода полнофакторного эксперимента. Переменными факторами были вылет стрелы, изменяемый гидроцилиндром 5 удлинителя 6 (1.6 м; 2.7 м; 3.8 м) и диаметры дросселей демпфера (0; 3.8; 7.6; 11.4 мм), изменяемые регулируемы дросселями 11 и 12 (см. рисунок 7). Выходными параметрами являлось давление в гидроприводе и расчетное значение коэффициента динамичности. Было проведено по 9 экспериментов согласно матрице планирования двухфакторного эксперимента в трехкратной повторности с подключением пневмогидроаккумулятора и без подключения, причем опыты при нулевом диаметре дросселя соответствует полному отключению демпфера.

На рисунок 8 для примера представлена осциллограмма давления в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра при ускоренном режиме при максимальном вылете стрелы 3,8 м и среднем открытии дросселей демпфера (диаметр дросселя 7,6 мм) без подключения пневмогидроаккумулятора а) и с подключением б). Первый всплеск давления 13,8 МПа возникает в начале подъема груза с опорной поверхности до горизонтального положения стрелы. второй 12,5 МПа при подъеме груза на высоту 1,92 м, третий 12,4 МПа при подъеме на высоту 2,75., четвертый 12,0 МПа на высоту 3,43 м. Далее идет процесс опускания стрелы при давлении около 2,8 МПа. Общий характер осциллограммы давления рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра подъема стрелы в начале подъема груза почти полностью совпадает с теоретическими графиками (рисунок 8).

Полученные экспериментальные осциллограммы давления рабочей жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра подъема стрелы при различных диаметрах дросселей демпфера, вылетах стрелы, высотах подъема обрабатываются в программе MS Excel с целью определения статистических характеристик динамической нагруженности для оценки динамической нагруженности и надежности.

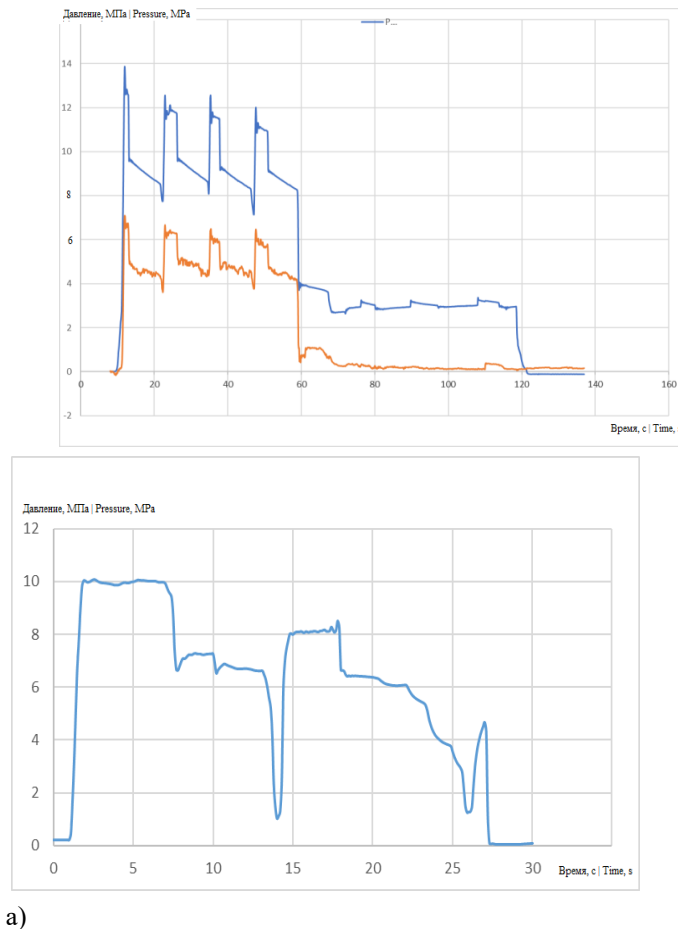


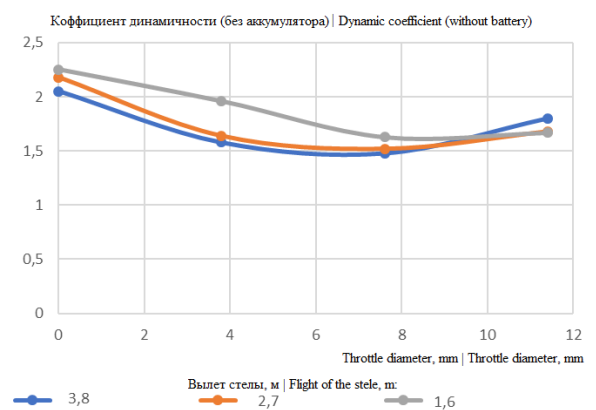
Рисунок 8. Осциллограммы давления в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра при ускоренном режиме при максимальном вылете стрелы 3.8 м а) без пневмогидроаккумулятора, б) с пневмогидроаккумулятором

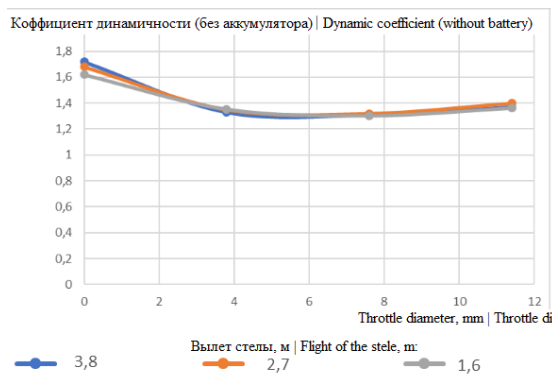
Figure 8. Pressure oscillograms in the piston and rod cavities of the hydraulic cylinder in the accelerated mode with a maximum boom length of 3.8 m and an average damper throttle opening а) without a pneumatic accumulator, б) with a pneumohydroaccumulator

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для оценки динамической нагруженности рассчитывался коэффициент динамичности. На рисунке 9 представлены графики зависимостей коэффициента динамичности от вылета стрелы и диаметра дросселя демпфера без подключения пневмогидроаккумулятора а) и при подключении б), из которых видно, что снижение динамической нагруженности при всех вылетах стрелы происходит при диаметрах дросселей от 3,8 мм до 7,6 мм.





б)

Рисунок 9. Графики зависимостей коэффициента динамичности от вылета стрелы и диаметра дросселя демпфера:

- а) без пневмогидроаккумулятора,
- б) с гидроаккумулятором

Figure 9. Graphs of the dependences of the dynamicity coefficient on the boom departure and the diameter of the damper throttle: a) without a pneumatic accumulator; b) with a hydraulic accumulator

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Подключение пневмогидроаккумулятора при диаметрах дросселей от 3,8 мм до 7,6 мм позволяет снизить коэффициенты динамической нагруженности. Без пневмогидроаккумулятора средний коэффициент динамичности 1,55 (а), а с пневмогидроаккумулятора средний коэффициент динамичности 1,32 (б), т.е. снижение по экспериментальным данным происходит на 23 % (по теоретическим данным на 18,5%, расхождение на 4,5 %). При отключении пневмогидроаккумулятора и

демпфера при нулевом диаметре дросселя коэффициент динамичности при различных вылетах стрелы находится в диапазоне 2,11...2,26, а при подключении пневмогидроаккумулятора в диапазоне 1,61...1,75.

Результаты и обсуждение

Согласно значениям показателей надежности, зависящих от полученных статистических данных (табл. 1), определены зависимости вероятностного коэффициента безопасности от времени эксплуатации гидроманипулятора ЛВ-210-01 при различных режимах работы (рисунок 10).

Нами предлагается производить расчет вероятностного коэффициента безопасности γ , который представляет собой число стандартов S , которые укладываются в интервале от $S = 0$ до $S = \bar{S}$.

Таким образом, коэффициент безопасности определяем по формуле

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\bar{R} + \bar{Q}}}, \quad (6)$$

где $\bar{R}, \bar{Q}$ – математическое ожидание прочности и нагрузки.

Так как значение дисперсии есть квадрат среднеквадратического отклонения величин прочности и нагрузки, формулу для нахождения характеристики безопасности γ (1) можно представить в виде

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}. \quad (7)$$

Таблица 1

Статистические характеристики давления рабочей жидкости в поршневой полости гидроцилиндра стрелы при максимальном вылете стрелы и среднем уровне открытия дросселей демпфера (диаметр дросселя 7.6 мм)

Table 1

Statistical characteristics of the pressure of the working fluid in the piston cavity of the boom hydraulic cylinder at the maximum boom reach and the average throttle opening level (throttle diameter 7.6 mm)

Статистические характеристики давления рабочей жидкости Statistical characteristics of the working fluid pressure	Давление рабочей жидкости при ускоренном режиме в начале подъема груза, без пневмогидроаккумулятора, МПа Accelerated mode, start of ascent, MPa	Давление рабочей жидкости при ускоренном режиме в начале подъема груза с пневмогидроаккумулятором, МПа Accelerated mode, lifting and lowering, MPa
Среднее Average	8,654812	8,460454
Стандартная ошибка The standard error	0,153945	0,197361
Медиана The median	9,28303	9,293015
Стандартное отклонение Standard deviation	1,385504	1,367359
Дисперсия выборки Sample variance	1,919621	1,919621
Экцесс Excess	1,511372	1,869671
Асимметричность Asymmetry	1,72665	-0,7243
Интервал Interval	5,66056	5,84199
Минимум Minimum	8,18714	5,32581
Максимум Maximum	13,847723	11,1678
Сумма The amount	793,75	422,7155
Счет Account	81	48
Коэффициент динамичности K_d Dynamic coefficient K_d	1,55	1,32

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Расчет зависимости вероятностного коэффициента безопасности γ от времени эксплуатации лесного гидроманипулятора ЛВ-210-01 показал (рисунок 10), что при ускоренном режиме работы без подключения пневмогидроаккумулятора допустимое значение коэффициента безопасности (1,5-2,0) достигается через 15-17 лет, в то время как с подключением пневмогидроаккумулятора в демпфирующее устройство позволяет продлить срок эксплуатации свыше 25 лет б).

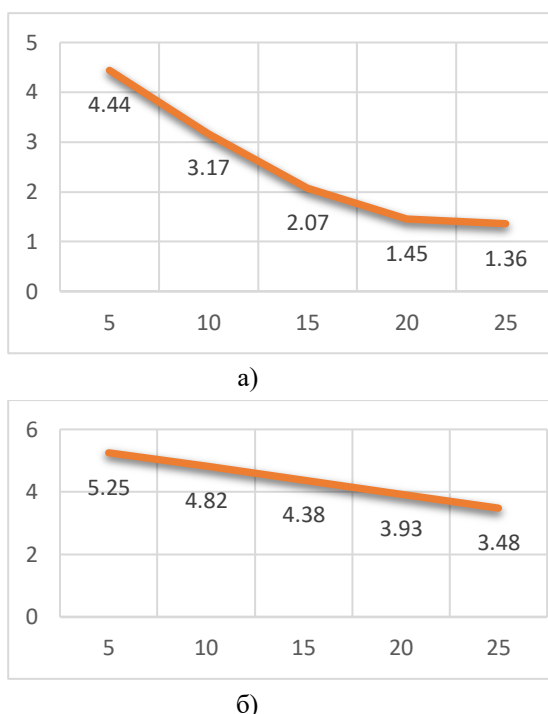


Рисунок 10. Зависимости вероятностного коэффициента безопасности от времени эксплуатации гидроманипулятора ЛВ-210-01 при ускоренном режиме работы:

- а) без пневмогидроаккумулятора,
- б) с пневмогидроаккумулятором

Figure 10. Dependence of the probability safety factor on the operating time of the LV-210-01 hydraulic manipulator in the accelerated mode of operation: a) without a pneumatic accumulator, b) a pneumohydroaccumulator

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Полученные результаты имеют практическое значение для оценки динамической нагруженности и надежности манипуляторов лесных машин на стадии проектирования.

Заключение

Анализ исследований рабочих процессов манипуляторов показали высокую динамическую нагруженность лесных гидроманипуляторов и недостаточную надежность металлоконструкций и элементов гидропривода. Одним из способов повышения надежности лесных машин манипуляторного типа является снижение динамических нагрузок за счет применения

различных демпфирующих устройств. Авторами предлагается новый грузоподъемный механизм стрелы, защищенный патентами на изобретение и на полезную модель, который позволяет обеспечить снижение динамической нагруженности и повышение надежности.

Разработана математическая модель грузоподъемного механизма лесного манипулятора с гидромеханическим демпфером и пневмогидроаккумулятором с учетом жесткости металлоконструкции стрелы. Решение задачи найдены, путем разложения функции в ряд Маклорена и представлены в виде конечных аналитических выражений для определения переменных параметров.

Получены теоретические зависимости давления рабочей жидкостив поршневой полости гидроцилиндра от времени без пневмогидроаккумулятора всплеск в начале подъема груза достигает 13,2 МПа, коэффициент динамичности 1,65, а с пневмогидроаккумулятором 10,8 МПа, коэффициент динамичности 1,35, т.е. снижение динамической нагруженности достигается на 22%.

Для проверки адекватности математической модели рабочего процесса грузоподъемного механизма проведены экспериментальные исследования на лабораторном стенде с серийным лесным гидроманипулятором ЛВ-210-01, который был оборудован контрольно- измерительными приборами и устройствами для измерения угла поворота стрелы и давления датчиками типа ZET 315, подсоединенными к тензометрической станции ZET 058. Проведены опыты согласно матрице планирования двухфакторного эксперимента для различных вылетов стрелы и диаметров дросселей демпфера. с остановками стрелы в различных положениях с углами подъема через 15°. В результате обработки осциллограмм получены статистические характеристики динамической нагруженности гидроманипулятора и рассчитаны коэффициенты динамичности.

Установлено, что подключение пневмогидроаккумулятора в демпфирующее устройство при диаметрах дросселей демпфера от 3,8 мм до 7,6 мм. позволяет снизить коэффициенты

динамической нагруженности. Без подключения пневмогидроаккумулятора средний коэффициент динамичности равен 1,55, а с пневмогидроаккумулятором средний коэффициент динамичности равен 1,32, т.е. снижение по экспериментальным данным происходит на 23 % (по теоретическим данным на 18,5%, расхождение на 4,5%, что допустимо). Для сравнения проведены опыты при отключении пневмогидроаккумулятора и демпфера при нулевом диаметре дросселя коэффициент динамичности при различных вылетах стрелы находится в диапазоне 2.11...2.26, что указывает на эффективность применения пневмогидравлического демпфирующего устройства на лесных гидроманипуляторах.

Расчет зависимости вероятностного

коэффициента безопасности γ от времени эксплуатации лесного гидроманипулятора ЛВ-210-01 показал, что при ускоренном режиме работы без подключения пневмогидроаккумулятора допустимое значение коэффициента безопасности (1,5-2,0) достигается через 15-17 лет, в то время как с подключением пневмогидроаккумулятора в демпфирующее устройство позволяет продлить срок эксплуатации свыше 25 лет.

Полученные результаты имеют практическое значение для оценки динамической нагруженности и надежности манипуляторов лесных машин на стадии проектирования и могут быть использованы в проектных организациях лесного машиностроения.

Список литературы

1. Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилушина Г.А., Шевелева Е.В. Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров // Известия. вузов. Лесной журнал – 2021. – № 6. – С. 135-149. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-135-149>.
2. Rybak A., Popikov, P., Bogdanov, D., Konyukhov, A. Investigation of the energy-saving hydraulic drive dynamics of the arrow lifting mechanism of the forestry manipulator. Networked control systems for connected and automated vehicles. 2022; 2:1995-2003. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_205.
3. Евсиков И.Д., Богданов Д.С., Попикова А.В., Конюхов А.В. Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 131–142. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>.
4. Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Казаков И.В. Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 5 (401). – С. 143-158. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-143-158>.
5. Голякевич С.А., Гороновский А.Р. Математическая модель динамики многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2024. – № 1 (276). – С. 132-143. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-18>.
6. Хиникадзе Т.А., Рыбак А.Т., Попиков П.И. Моделирование гидравлической системы устройства с самоадаптацией по силовым и кинематическим параметрам на рабочем органе // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21, No 1. – С. 55-61. – DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61>.
7. Li L., Lin Z., Jiang Y., Yu C., Yao J. Valve deadzone / backlash compensation for lifting motion control of hydraulic manipulators. Machines. 2021; 9(3): 57. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9030057>.
8. Jensen K.J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel concept for electro-hydrostatic actuators for motion control of hydraulic manipulators. Energies. 2021; 14(20): 6566. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>.
9. Petrovic G. R., Mattila J. Mathematical modelling and virtual decomposition control of heavy-duty parallel-serial hydraulic manipulators. Mechanism and Machine Theory. 2022; 170: 104680. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.05322>.

10. Xia Y., Nie Y., Chen Z., Lyu L., Hu P., Motion control of a hydraulic manipulator with adaptive nonlinear model compensation and comparative experiments. *Machines*. 2022; 10(3): 214. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10030214>.
11. Han J., Wang F., Sun C. Trajectory tracking control of a manipulator based on an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Applied Sciences*. 2023; 13(2):1046. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021046>.
12. Kim M., Lee S.-U., Kim S.-S. Real-time simulator of a six degree-of-freedom hydraulic manipulator for pipe-cutting applications. *IEEE Access*. 2021; 9: 153371 - 153381 vol. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127502>.
13. Łopatka M.J., Krogul P., Rubiec A., Przybysz M. Preliminary experimental research on the influence of counterbalance valves on the operation of a heavy hydraulic manipulator during long-range straight-line movement. *Energies*. 2022; 15(15): 5596. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155596>.
14. Селиверстов Г.В., Коломиец К.С., Анцев В.Ю., Анцев Н.В. Взаимосвязь усталостных и коррозионных процессов при оценке ресурса несущих металлоконструкций грузоподъемных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 3 – С. 132-137. – DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-132-137>.
15. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26. № 5. – С. 93–101. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>.
16. Brian C. Delaney, Q. Jane Wang, Vedant Aggarwal, Wei Chen, Ryan D. Evans. A contemporary review and data-driven evaluation of Archard-type wear laws, *Appl. Mech. Rev.* March 2025; 77(2): 022101. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4068297>.
17. Erişir E., Ararat Ö. & Bilir O.G. Enhancing Wear Resistance of 100Cr6 Bearing Steels by New Heat Treatment Method. *Metall Mater Trans A*. 2022; 53: 850–860. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06556-3>.
18. Zhang M., Ga, J., Han R. et al. Tribological Properties of AISI 52100 Bearing Steel under Different Sliding Distance and Normal Force Conditions. *J. of Materi Eng and Perform.* 2025; 34: 5081–5093. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09512-5>.
19. Dolzhenko A., Pydrin A., Gaidar S., Kaibyshev R., Belyakov A. Microstructure and Strengthening Mechanisms in an HSLA Steel Subjected to Tempforming. *Metals*. 2022; 12: 48. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met12010048>.
20. Salvini M., Grill N., Demir E., He S., Martin T., Flewitt P., Mostafavi M., Truman C., & Knowles D. Effect of grain boundary misorientation and carbide precipitation on damage initiation: A coupled crystal plasticity and phase field damage study. *International Journal of Plasticity*. 2024; 172: 103854. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103854>.

References

1. Pamfilov E.A., Kapustin V.V., Pilyushina G.A., Sheveleva E.V. Povishenie rabotosposobnosti rabochikh organov i tribosistem tekhnologicheskogo oborudovaniya kharvesterov [Improving the efficiency of the working organs and tribosystems of harvester technological equipment] *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2021; 6: 135-149. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-135-149>.
2. Rybak A., Popikov, P., Bogdanov, D., Konyukhov, A. Investigation of the energy-saving hydraulic drive dynamics of the arrow lifting mechanism of the forestry manipulator. *Networked control systems for connected and automated vehicles*. 2022; 2:1995-2003. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-11051-1_205.
3. Yevsikov I.D., Bogdanov D.S., Popikova A.V., Konyukhov A.V. Vliyanie podatlivosti gidroprivoda na dinamicheskuyu nagruzhennost mekhanizmov lesnogo manipulyatora [The effect of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forest manipulator mechanisms]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2023; 13(3): 131–142. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>.
4. Posmetev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetev V.V., Kazakov I.V. Modelirovanie povorotnogo mekhanizma gidromanipulyatora lesovoznogo avtomobilya. [Simulation of the rotary mechanism of the hydraulic

- manipulator of a logging vehicle]. *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2024; 5: 143-158. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-143-158>.
5. Golyakevich S.A., Goronovskii A.R. Matematicheskaya model dinamiki mnogooperatsionnikh lesozagotovitelnykh mashin. [Mathematical model of dynamics of multi-operational logging machines]. *Lesnoe khoz-vo, prirodopolzovanie i pererab. vozobnovlyаемikh resursov*, 2024; 1: 132-143. – DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2024-276-18>.
 6. Khinikadze T.A., Ribak A.T., Popikov P.I. Modelirovanie gidravlicheskoj sistemi ustroystva s samoadaptatsiei po silovim i kinematicheskim parametram na rabochem organe [Simulation of the hydraulic system of a device with self-adaptation according to power and kinematic parameters on a working body]. *Advanced Engineering Research*, 2021; 21(1): 55-61. – DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61>.
 7. Li L., Lin Z., Jiang Y., Yu C., Yao J. Valve deadzone / backlash compensation for lifting motion control of hydraulic manipulators. *Machines*. 2021; 9(3): 57. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9030057>.
 8. Jensen K.J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel concept for electro-hydrostatic actuators for motion control of hydraulic manipulators. *Energies*. 2021; 14(20): 6566. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>.
 9. Petrovic G. R., Mattila J. Mathematical modelling and virtual decomposition control of heavy-duty parallel-serial hydraulic manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 2022; 170: 104680. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.05322>.
 10. Xia Y., Nie Y., Chen Z., Lyu L., Hu P., Motion control of a hydraulic manipulator with adaptive nonlinear model compensation and comparative experiments. *Machines*. 2022; 10(3): 214. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10030214>.
 11. Han J., Wang F., Sun C. Trajectory tracking control of a manipulator based on an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Applied Sciences*. 2023; 13(2):1046. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021046>.
 12. Kim M., Lee S.-U., Kim S.-S. Real-time simulator of a six degree-of-freedom hydraulic manipulator for pipe-cutting applications. *IEEE Access*, 2021; 9: 153371 - 153381 vol. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127502>.
 13. Łopatka M.J., Krogul P., Rubiec A., Przybysz M. Preliminary experimental research on the influence of counterbalance valves on the operation of a heavy hydraulic manipulator during long-range straight-line movement. *Energies*. 2022; 15(15): 5596. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155596>.
 14. Seliverstov G.V., Kolomiets K.S., Antsev V.Yu., Antsev N.V. Vzaimosvyaz ustalostnykh i korrozionnykh protsessov pri otsenke resursa nesushchikh metallokonstruktsii gruzopodemnykh mashin [The relationship between fatigue and corrosion processes in assessing the life of load-bearing metal structures of lifting machines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2021; 3: 132-137. – DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-132-137>.
 15. Mokhirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Verner N.N., Shvetsova V.V. Otsenka nadezhnosti lesozagotovitel'nogo kharvestera [Assessment of the reliability of the logging harvester]. *Lesnoi vestnik / Forestry Bulletin*. 2022; 26(5): 93-101. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>.
 16. Brian C. Delaney, Q. Jane Wang, Vedant Aggarwal, Wei Chen, Ryan D. Evans. A contemporary review and data-driven evaluation of Archard-type wear laws, *Appl. Mech. Rev.* March 2025; 77(2): 022101. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4068297>.
 17. Erişir E., Ararat Ö. & Bilir O.G. Enhancing Wear Resistance of 100Cr6 Bearing Steels by New Heat Treatment Method. *Metall Mater Trans A*. 2022; 53: 850–860. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06556-3>.
 18. Zhang M., Ga, J., Han R. et al. Tribological Properties of AISI 52100 Bearing Steel under Different Sliding Distance and Normal Force Conditions. *J. of Materi Eng and Perform.* 2025; 34: 5081–5093. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09512-5>.
 19. Dolzhenko A., Pydrin A., Gaidar S., Kaibyshev R., Belyakov A. Microstructure and Strengthening Mechanisms in an HSLA Steel Subjected to Tempforming. *Metals*. 2022; 12: 48. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met12010048>.

20. Salvini M., Grill N., Demir E., He S., Martin T., Flewitt P., Mostafavi M., Truman C., Knowles D. Effect of grain boundary misorientation and carbide precipitation on damage initiation: A coupled crystal plasticity and phase field damage study. *International Journal of Plasticity*. 2024; 172: 103854. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103854>.

Сведения об авторах

✉ *Четверикова Ирина Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9726-3218>, e-mail: chivles@rambler.ru.

Попикова Алина Викторовна – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: poalinka@mail.ru.

Боровиков Роман Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>, e-mail: borovikov_roman@mail.ru.

Зимарин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>, e-mail: teachercd058@vglta.vrn.ru.

Попиков Сергей Константинович – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: sergpopikov@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Irina V. Chetverikova* – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9726-3218>, e-mail: chivles@rambler.ru.

Alina V. Popikova – Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: poalinka@mail.ru.

Roman G. Borovikov – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5872-6291>, e-mail: borovikov_roman@mail.ru.

Sergey V. Zimarin – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>, e-mail: teachercd058@vglta.vrn.ru.

Sergei K. Popikov – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: sergpopikov@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author



Добровольная лесная сертификация как инструмент сдерживания климатических изменений и адаптации лесов к ним

Михаил Л. Карпачевский¹✉, m.kapachevskiy@forest-etalon.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-9585-6228>

Татьяна О. Яницкая¹, t.yanitskaya@forest-etalon.ru

Николай М. Шматков¹, n.shmatkov@forest-etalon.ru

Евгений А. Шварц², e.a.shvarts@igras.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6828-4367>

¹ Добровольная система лесной сертификации «Лесной эталон», 2-я Брестская, 46 стр.1, офис 6, Москва, 125047, Российская Федерация

² Институт географии РАН, Старомонетный пер, 29, стр. 4, Москва, 119017, Российская Федерация

Многие требования стандартов лесопользования систем добровольной лесной сертификации (ДЛС) в отношении ведения лесного хозяйства и лесозаготовок полностью отвечают международно признанным критериям улучшенным управлением лесами (УУЛ) лесоклиматических проектов. Среди них сохранение ценных лесов (особенно малонарушенных и старовозрастных), создание продуктивных лесных культур, оставление при лесозаготовках ключевых биотопов (крупных деревьев, деревьев редких пород, крупных древесных остатков), сохранение иных местообитаний редких и исчезающих видов, меры по обеспечению мозаичности ландшафта, а также минимизации воздействия на растительный покров, гидрологический режим территории и почвы. В силу этого ДЛС может рассматриваться в качестве инструмента, который вносит дополнительный измеримый вклад в противодействие изменению климата и адаптацию лесов по сравнению со обычным уровнем лесопользования. Держатель сертификата ДЛС на основании результатов мониторинга с помощью стандартных методик расчета запасов углерода в лесах вполне может получить и количественные оценки увеличения депонированию углерода в сертифицированных лесах. Такие количественные оценки могут быть использованы розничными продавцами и крупными потребителями сертифицированной продукции для демонстрации своего вклада в противодействие изменению климата и адаптации лесов.

Ключевые слова: адаптация к изменению климата, добровольная лесная сертификация, улучшенное управление лесами, малонарушенные леса

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Добровольная лесная сертификация как инструмент сдерживания климатических изменений и адаптации лесов к ним / М. Л. Карпачевский, Т. О. Яницкая, Н. М. Шматков, Е. А. Шварц // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 229–246. – Библиогр.: с. 241–245 (32 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/15>.

Поступила 01.03.2025. Пересмотрена 12.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Voluntary forest certification as an instrument of climate change mitigation and forest adaptation

Mikhail L. Karpachevskiy¹ ✉, m.kapachevskiy@forest-etalon.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-9585-6228>

Tatiana Yanitskaya¹, t.yanitskaya@forest-etalon.ru

Nikolay M. Shmatkov¹, n.shmatkov@forest-etalon.ru

Evgeny A. Shvarts², e.a.shvarts@igras.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6828-4367>

¹Voluntary Forest Certification System "Forest Etalon", Moscow, 125047, Russian Federation

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017, Russian Federation

Abstract

Many requirements of forest management standards of voluntary forest certification systems (VFC) regarding forest management completely comply with internationally recognized criteria for improved forest management (IFM) used in climate forest projects. This includes conservation of valuable forests (especially intact and old-growth), establishment of productive artificial stands, retention of key habitats (large trees, rare tree species, coarse woody debris), retention of other habitats of rare and threatened species, measures of preservation of mosaic landscape as well as minimization of the impact on vegetation cover, hydrological regime of the area and soils. Therefore, VFC can be viewed as an instrument, which additionally quantitatively contributes to climate change mitigation and forest adaptation relatively the baseline level of forest management. A certificate holder of VFC based on monitoring results and using standard methods to calculate carbon stock in forests is able to receive some quantitative estimates of increased carbon accumulation in certified forests. Such quantitative estimates can be used by retailers and large buyers of certified products to demonstrate their contribution to climate change mitigation and forest adaptation.

Keywords: climate change adaptation, voluntary forest certification, improved forest management, intact and old-growth forests

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Karpachevskiy M. L., Yanitskaya T. O., Shmatkov N. M., Shvarts E. A. (2026). Voluntary forest certification as an instrument of climate change mitigation and forest adaptation. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 229–246 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/15>.

Received 01.03.2025.

Revised 12.02.2026.

Accepted 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Изменение климата признано одним из наиболее серьезных вызовов современности, оказывающим multifaceted воздействие на природные экосистемы и экономику. Леса, занимающие около 30% суши планеты, играют ключевую двойную роль в этом процессе. С одной стороны, они являются мощным поглотителем парниковых газов, аккумулируя углерод в фитомассе и почве, что делает их важнейшим элементом глобальной стратегии по сдерживанию климатических изменений. С другой стороны, леса сами крайне уязвимы перед последствиями этих изменений: участвовавшие засухи, лесные пожары, вспышки массового размножения вредителей и экстремальные погодные явления приводят к

деградации лесных экосистем, снижению их продуктивности и даже к трансформации их из стока в источник углерода.

В ответ на эти вызовы международное сообщество разрабатывает различные политические и экономические механизмы, направленные на сохранение и устойчивое управление лесами. Однако эффективность государственных регуляторных мер зачастую ограничена их инерционностью и сложностью адаптации к быстро меняющимся условиям. В этой связи возрастает роль добровольных рыночных инструментов, среди которых особое место занимает добровольная лесная сертификация.

Первоначально созданная как механизм подтверждения легальности и экологической

ответственности лесопользования (например, схемы FSC и PEFC), сегодня лесная сертификация все чаще рассматривается в более широком контексте – как потенциальный инструмент реализации климатической политики. Сертификационные требования к сохранению биоразнообразия, поддержанию защитных функций леса и неистощительности лесопользования могут способствовать повышению устойчивости лесов к климатическим стрессам (адаптация). Одновременно с этим, стимулируя ответственное лесовосстановление и предотвращая деградацию лесов, сертификация способствует сохранению и увеличению запасов углерода (митигация).

Несмотря на растущее понимание климатического потенциала добровольной лесной сертификации, научных работ, количественно оценивающих ее вклад в сдерживание изменений климата и адаптацию к ним, недостаточно. Остаются открытыми вопросы о том, насколько существующие стандарты учитывают климатические риски, как сертификация влияет на углеродный баланс сертифицированных участков по сравнению с несертифицированными, и какие дополнительные "климатические" критерии могут быть в нее интегрированы.

M. Girona с коллегами (2023) [1] указывают, что климат и последствия его изменения все сильнее сказываются на функционировании бореальных лесов, в связи с чем управление на экосистемной основе сталкивается с проблемами из-за изменения режима природных нарушений, потерей биологического разнообразия, усилением фрагментации лесов, быстрым сокращением площадей старовозрастных (малонарушенных) лесов и необходимостью разработки новых лесоводственных подходов. Климатическая доктрина Российской Федерации ставит задачу достижения климатической нейтральности страны к 2060 году²⁸. Согласно целевому сценарию Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года²⁹ нетто-поглощение парниковых газов в секторе землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (т.е. для управляемых природных экосистем, или сектора

ЗИЗЛХ) к 2050 году должно увеличиться до 1,2 млрд т CO₂ экв в год, или на 0,69 млрд т CO₂ экв. в год. В 2024 году оценка нетто-поглощения парниковых газов экосистемами страны была существенно увеличена с 0,55 до 1,08 млрд т CO₂ экв. в год (по данным первого этапа Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Российская система климатического мониторинга», проект курируется Минэкономразвития Российской Федерации)³⁰. Однако, такое повышение оценки не отменяет необходимости решения задачи повышения поглотительной способности российских лесов и их адаптационного потенциала. А это напрямую зависит от того, удастся ли снизить риски возникновения катастрофических лесных пожаров, улучшить качество лесовосстановления, обеспечить воспроизводство хозяйственно ценной древесины и повысить долгосрочную устойчивость лесов. Недавний анализ Института мировых ресурсов глобальных данных дистанционного зондирования показал [2]), что за последние 24 года темпы накопления углерода мировыми лесами неуклонно снижались. Если в 2001 году леса депонировали 9,5 млрд т CO₂ эквивалента в год, то в 2024 году – уже только 1,7 млрд т в год. В немалой степени этому способствуют растущие объемы заготовки древесины, благодаря чему эмиссия парниковых газов за 24 года увеличилась с 1,4 до 2,7 млрд т CO₂ экв. в год. Но еще тревожней выглядит тенденция роста эмиссии парниковых газов от катастрофических лесных пожаров, в том числе в бореальных лесах Канады и России. За 24 года глобальная эмиссия от пожаров выросла в 8 раз с 0,5 млрд т до 4,1 млрд т CO₂ экв. в год. В свою очередь само обострение проблемы катастрофических лесных пожаров непосредственно связывают с изменением климата [3-5]. Следует упомянуть, что качество искусственного лесовосстановления в России в целом остается невысоким, а основная ставка при этом по-прежнему делается на выращивание экономически ценных хвойных пород, без учета экологической ценности создаваемых лесов и их способности к адаптации к изменению климата [6; 7]. При этом даже в странах Фенноскандии, которые традиционно приводятся в

²⁸ Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009?index=1>.

²⁹ Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 N 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года». – URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657.

³⁰ Минэкономразвития представило итоги первого этапа реализации «Российской системы климатического мониторинга». – URL: https://economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_predstavilo_itogi_pervogo_etapa_realizacii_rossiyskoy_sistemy_klimaticheskogo_monitoringa.html (дата обращения: 10.12.2025).

пример с точки зрения качества управления лесами, в связи с изменением климата словые монокультуры оказались подвержены ураганам ветрам, участвовавшим в последние годы, а также вспышкам размножения насекомых [8, 9]. В глобальном масштабе Россия может внести существенный вклад в изменение данных негативных тенденций, но только при условии существенного повышения качества управления лесами страны.

В 2017 году появилось нормативное требование по включению списка адаптационных мер в лесные планы субъектов Российской Федерации [10]. Хотя в последние годы затраты на адаптационные мероприятия, направленных на снижение климатических рисков, заметно выросли [11], опыт последних десятилетий показал, что одними только административно-принудительными мерами (например, через реализацию на национальном уровне положений Парижского соглашения) задачу увеличения поглощения парниковых газов экосистемами страны и адаптации лесов к изменению климата не решить. Крайне важно, чтобы также работали инструменты, основанные на рыночных механизмах. В последнее время наиболее широко и предметно в качестве такого рассматривают углеродные рынки и связанные с ними так называемые природно-климатические и, в частности лесоклиматические проекты (ЛКП). ЛКП реализуются как часть национальных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов, так и в качестве элементов добровольных систем сертификации углеродных кредитов для компенсации выбросов парниковых газов [12]. Как показано L. Kaarakka с коллегами (2021) [13] и В. Коротковым (2022) [12], непосредственно в рамках ЛКП в качестве экономически эффективных приемов применяют приемы так называемого улучшенного управления лесами (УУЛ), которые являются частью природных климатических решений. Помимо собственно дополнительного депонирования углерода в природных экосистемах, такие приемы должны способствовать лучшему выполнению и других экосистемных функций, например, сохранению биологического разнообразия [14; 15]. Многие из таких приемов давно известны специалистам лесного хозяйства и хорошо себя зарекомендовали на практике, но используются в первую очередь для решения иных задач, например, сохранения биологического разнообразия и выращивания продуктивных хозяйственно ценных лесов. Унифицированного определения УУЛ не существует, но наиболее широко используется формулировка агентства штата Калифорния – Калифорнийского совета по воздушным ресурсам [16, с. 3]: «УУЛ это деятельность по управлению лесами, которая ведет к увеличению запасов

углерода в лесных землях по сравнению с базовым уровнем его запасов». На данном определении, в частности, основан наиболее популярный на международной арене стандарт сертификации углеродных кредитов для компенсации выбросов парниковых газов Verified Carbon Standard, управляемый организацией VERRA [13]. Обобщив различные определения, L. Kaarakka с коллегами (2021) [13] приводят следующие приемы УУЛ:

- увеличение длительности оборота рубки;
- проведение рубок ухода, способствующих повышению качества древостоя и управлению горючими материалами;
- формирование разновозрастных насаждений (в том числе с помощью выборочных рубок);
- способствование естественному восстановлению/возобновлению леса и сохранению подроста;
- выбор видов: сохранение местных видов и, если возможно, увеличение числа пород в древостое;
- минимизация повреждения деревьев, оставляемых при заготовке;
- минимизация нарушения почв и нанесения связанного ущерба: уплотнения, перемешивания и перемещения почвы;
- сохранение крупных древесных остатков в древостое (пней, валежа, сухостоя).

Следует сказать, что в настоящий момент изменение запаса почвенного углерода учитывается в приемах УУЛ (и в ЛКП) только в ограниченном числе случаев [13].

Говоря о ЛКП как рыночном инструменте, вполне успешно функционирующим на международном уровне, важно оговориться, что подходы к разработке и реализации ЛКП в России и их совместимость с международными требованиями в данной сфере вызывают ряд справедливых нареканий и вопросов [17]. Также следует отметить, что, по мнению многих специалистов [14; 17–19], несмотря на очевидные перспективы, экономический потенциал климатических проектов в России, особенно природно-климатических, для получения углеродных единиц существенно ниже, чем предполагалось ранее, а их реализация связана с существенными рисками. На этом фоне незаслуженно мало внимания получают иные, давно работающие в России рыночные инструменты, например, добровольная лесная сертификация (ДЛС), которая также способствует внедрению

наилучших практик, связанных с грамотным управлением лесам, в том числе с точки зрения сохранения биологического разнообразия, учета прав местных сообществ и коренных народов [20-25]. Признано [25, с. 520], что в бореальных странах, в частности в России, именно стандарты ДЛС в последние десятилетия стали лидирующим рыночным инструментом в области управления лесами.

Многие годы российский лесной бизнес рассматривал сертификаты международно признанных систем ДЛС – FSC и PEFC – главным образом как пропуск на зарубежные экологически чувствительные рынки. Системно продвижением своей продукции как имеющей ответственное происхождение на внутреннем российском и международных азиатских рынках лесной бизнес не занимался. Вместе с тем для российского ритейла и крупных потребителей продукции из древесины, включая бумагу и упаковку, использование сертифицированных материалов также важно с точки зрения социально-экологической ответственности, а также для управления рисками. Главная цель крупного ритейла – исключить риск попадания в цепочки поставок древесной продукции, которая имеет нелегальное или «сомнительное» происхождение, особенно если это может связать их с конфликтными и скандальными ситуациями на социальной и экологической почве. Иногда крупный бизнес коммуницирует наличие сертификата ДЛС как свой вклад в сохранение биологического разнообразия или развитие местных сообществ. Но вот о том, что благодаря ДЛС также вносится существенный вклад в противодействие изменению климата, они мало осведомлены. Хотя примеры такие были [26]. Государство вообще не воспринимает ДЛС всерьез в качестве инструмента своей климатической политики.

Данная статья призвана хотя бы частично заполнить этот пробел. В ней мы на конкретных примерах анализируем, как в стандартах лесопользования ДЛС отражены климатически-ориентированные требования, в том числе какие используемые в рамках ДЛС лесозаготовительные и лесохозяйственные практики способствуют снижению выбросов парниковых газов или увеличения поглотительной способности лесов, а также адаптации лесов к изменению климата.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объектом исследования является оценка возможности использования ДЛС в качестве практического инструмента, способствующего предотвращению изменения климата и адаптации лесов в России. Предмет исследования – оценка требований стандартов лесопользования систем ДЛС

на предмет их соответствия приемам улучшенного управления лесами, которые используются в лесоклиматических проектах. Набор требований стандартов к ведению лесного хозяйства и лесопользования у разных систем ДЛС во многом пересекается, но их планка, требования к организации и проведению сертификации, как и механизмы продвижения на рынках весьма различны. Чтобы быть эффективной, система ДЛС должна отвечать, как минимум, трем условиям. Во-первых, ее стандарты должны накладываться на лесопользователя какие-то дополнительные обязательства по сравнению с обычными условиями ведения бизнеса. Набор и содержание этих дополнительных обязательств в отношении лесного хозяйства и лесопользования должны соответствовать международно принятым представлениям об ответственном лесопользовании. Во-вторых, должна существовать возможность количественной оценки эффекта сертификации в части воздействия на климат. В-третьих, результаты сертификации и расчеты, сделанные на их основе, должны быть прозрачны и доступны (например, в виде доступных публичных отчетов, информации компаний о своей деятельности), а их достоверность и научную обоснованность можно оценить.

Сбор данных

В настоящий момент на российском рынке присутствуют четыре системы ДЛС (Табл. 1): Национальная система лесной сертификации (НСЛС, <https://nsfc.gostinfo.ru/>), система «Лесной эталон» (<https://forest-etalon.org/>), система SFMRU/38200 (<https://sfm38200.ru/index.html>) и «Устойчивый лес» (<https://устойчивыйлес.рф/>). Международные системы FSC (fsc.org) и PEFC (pefc.org), которые работали в России многие годы, ушли из России в 2022–2023 годах. Вместе с тем, стандарт системы «Лесной эталон» СТО-42952298-001-2022 «Сертификация лесопользования» фактически идентичен по требованиям Национальному стандарту лесопользования FSC для Российской Федерации FSC-STD-RUS-02.1-2020RU, а в качестве стандарта лесопользования система SFMRU/38200 использует ГОСТ Р 58003—2017 «Лесопользование и лесопользование», который идентичен национальному стандарту, который ранее использовался PEFC. Стандарты лесопользования НСЛС и УЛ не имеют международных аналогов. У FSC и «Лесного эталона» публичные отчеты о сертификации размещаются на сайте. НСЛС не размещает такие отчеты, а отчеты SFMRU/38200, хоть и размещаются на сайте, не содержат информации о результатах деятельности сертифицированных компаний. У системы УЛ выдан всего один сертификат лесопользования. В связи с этим для анализа требований, имеющих положительный эффект с точки зрения

Природопользование

предотвращения изменения климата, был выбрана система «Лесной эталон», которая отвечает всем вышеприведенным требованиям для анализа и выдала достаточно большое количество сертификатов лесоправления.

Результаты хозяйственной деятельности держателей сертификатов доступны в виде публичных отчетов и иных документов компаний (краткое резюме плана лесоправления, ежегодные отчеты о мониторинге хозяйственной

деятельности). При этом, благодаря идентичности стандарта лесоправления системы «Лесной эталон» стандарту международной системы FSC и в целом преемственности систем (держатели сертификатов «Лесного эталона» в подавляющем большинстве ранее являлись держателями сертификатам FSC), информацию о хозяйственной деятельности держателей сертификатов можно проследить в течение длительного времени.

Таблица 1

Системы ДЛС в России и доступность информации о деятельности сертифицированных лесозаготовительных компаний

Table 1

VFC systems in Russia and the availability of information on the activity of certified timber harvesting organizations

Характеристика Characteristics	«Лесной эталон» Forest Etalon	НСЛС NSFC	SFMRU/38200	«Устойчивый лес» Sustainable Forest	FSC	PEFC
Доступность стандартов лесоправления Accessibility of forest management standards	да yes	да yes	да yes	да yes	да yes	да yes
Количество действующих сертификатов лесоправления Number of valid certificates	56	13	12	1	отсутствуют not available	отсутствуют not available
Доступность публичных отчетов по сертификации лесоправления Accessibility of public reports of forest management certification	да yes	нет no	да yes	да yes	да yes	да yes
Публичная доступность результатов хозяйственной деятельности Public accessibility of the results of forest management activities	да yes	нет no	нет no	да yes	да yes	нет no

Примечание: Сведения о доступной информации относятся к сертификатам лесоправления FSC, которые действовали до 30 апреля 2023 года, и сертификатам лесоправления PEFC, которые действовали до 11 августа 2022 года.

Note: Data about available information refer to FSC forest management certificates that were valid before April 30 2023 and PEFC forest management certificates that were valid before August 2022.

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

Анализ данных

В рамках данного исследования требования стандарта лесопользования СТО-42952298-001-2022 были соотнесены с утвержденными российскими методологиями лесоклиматических проектов, в частности Методологией реализации климатического проекта № 0012 «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе снижение воздействия лесозаготовок»³¹, Методологией реализации климатического проекта № 0011 «Улучшенное управление лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров»³², Методологией реализации климатического проекта № 0010 «Лесовосстановление»³³, которые размещены в Реестре углеродных единиц (<https://carbonreg.ru/>), а также с методологией VM0045 «Улучшенное управление лесами с использованием динамически согласованных базовых линий из национальных лесных инвентаризаций, версия 1.2»³⁴. Последняя методология разработана организацией Verra, которая администрирует международно признанную систему добровольной сертификации углеродных кредитов для компенсации эмиссии парниковых газов Verified carbon standard.

Следует отметить, что российские методологии улучшенного управления лесным хозяйством весьма неконкретны в отношении собственно описания допустимых методов УУЛ. Более того, в отличие от международной практики, российские методологии прямо не указывают на сохранение лесов в качестве метода накопления углерода и/или предотвращения эмиссии парниковых газов. При заготовке древесины в качестве допустимых прямо упоминаются лишь методы, приводящие к уменьшению нарушений подроста, почвенного покрова и подстилки, а при лесовосстановлении рекомендуется использовать не менее 5 местных видов деревьев и кустарников. Также ЛКП запрещается реализовывать на землях водно-болотных угодий, в том числе на осушенных торфяниках. В отношении охраны лесов от пожаров методологии ограничиваются общими ссылками на действующее законодательство. Методологии VM0045 организации Verra содержат намного более обширный перечень допустимых приемов УУЛ, включая:

- посадку деревьев во вторичные, часто деградированные леса с целью обогащения их породного состава и увеличения общего запаса древесины;
- обеспечение естественного возобновления путем контроля конкурирующей растительности;
- обеспечение лесонасаждений водой и/или применение удобрений;
- снижение объемов заготовки древесины;
- сохранение части деревьев при заготовке древесины в качестве элемента будущего леса или удлинение срока оборота рубки;
- сохранение участков лесов;
- изменение пожарной опасности путем контроля объема горючих материалов.

Данные о площадях сохраняемых участков ценных лесов держателями сертификатов системы «Лесной эталон» анализировались по публичным отчетам и иным документами компаний (краткое резюме плана лесопользования, ежегодные отчеты о мониторинге хозяйственной деятельности).

Результаты

Стандарт лесопользования системы «Лесной эталон» не содержит специальных требований по предотвращению эмиссии парниковых газов, противодействию глобальному потеплению, снижению углеродного следа и т.д. Более того, слова «эмиссия», «парниковые газы», «углеродный след» в стандарте вообще не встречаются, несколько раз упоминаются лишь депонирование или связывание углерода. Однако, многие требования стандарта в качестве одного из эффектов предполагают как раз положительное воздействие с точки зрения предотвращения изменения климата, а также предполагают применение приемов, которые соответствуют улучшенному управлению лесами ЛКП.

Сохранение участков ценных лесов

Сохранение ценных участков лесов (Принцип 9, Приложение D) не только предотвращает эмиссию уже накопленного

³¹ URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960012_rus.pdf.

³² URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960011_rus.pdf.

³³ URL: https://carbonreg.ru/pdf/methodology/accepted/CPM%20%E2%84%960010_rus.pdf.

³⁴ VCS Methodology. VM0045. Improved forest management using dynamic matched baselines from national forest inventories. Version 1.2 10 July 2025 (Методология Verra VM0045 «Улучшенное управление лесами с использованием динамически согласованных базовых линий из национальных лесных инвентаризаций, версия 1.2»). URL: <https://carbonplatform.ru/verra-vm0045>.

углерода, но и обеспечивает дальнейшее его накопление. В лесах, сертифицированных по системе «Лесной эталон», площадь защитных лесов (в том числе особо охраняемых природных территорий (ООПТ)) и особо защитных участков леса составляет 2,48 млн га, или 31% от общей сертифицированной площади (все расчеты здесь и ниже сделаны на апрель 2025 года, в расчете учтено 7,9 млн га) (Рис. 1). Требования системы «Лесной эталон» дополнительно предусматривают сохранение участков лесов, которые проектируются в качестве ООПТ, даже если запрет на заготовку древесины для таких участков отсутствует (еще 0,13 тыс. га). На сертифицированной территории также могут находиться участки, которые обладают высокими природоохранными ценностями (ВПЦ), но по закону не сохраняются. Держатели сертификатов системы «Лесной эталон» добровольно сохраняют таким образом еще 0,26 млн. га лесов (Рис. 2). Таким образом, всего добровольно сохраняется 0,4 млн га ВПЦ (5% от сертифицированной площади). В первую очередь компании должны обеспечить максимально возможное сохранение старовозрастных и малонарушенных лесов (включая малонарушенные лесные территории, и малонарушенные лесные массивы), в качестве лесов с ВПЦ. Тут следует отметить, что в данном вопросе требования системы «Лесной эталон» полностью аналогичны требованиям международной схемы FSC³⁵.

В соответствии с со сложившимися международными представлениями [13] и, в частности, методологией Verra, сохранение дополнительных ценных участков леса, особенно малонарушенных и старовозрастных, рассматривается и в качестве приема ЛКП, а также способствуют адаптации лесов.

Российские методологии улучшенного управления лесами не касаются вопроса сохранения малонарушенных (старовозрастных) лесов в качестве приема УУЛ.

Стандарт системы «Лесной эталон» требует сохранения и многих других типов ценных лесов. Это могут быть небольшие и даже совсем маленькие

участки лесов, но чаще всего они тоже имеют большой возраст, а значит, обладают теми же особенностями. Главное, что, согласно стандарту, от предприятия в любом случае требуется сохранить не менее 10% своей площади в виде сети охраняемых участков, рубки на которых должны быть запрещены или сильно ограничены. Тем самым любой держатель сертификата лесопользования системы «Лесной эталон» вносит вклад в сохранение связанного углерода, даже если на его территории нет массивов старовозрастных или малонарушенных лесов.

Лесовосстановление и воспроизводство лесов

Может вносить вклад в связывание углерода и требование стандарта по восстановлению лесного покрова до его исходного или до более естественного состояния (Критерий 10.1). Оно конкретизируется – необходимо обеспечить лесовосстановление хозяйственно ценными породами, но также и сохранить и все породы деревьев, в естественном состоянии присутствующие в лесу (Критерий 10.2). То есть, нельзя допускать, чтобы вырубки зарастали бурьяном, который фактически не запасает углерод, или малоценными породами. Последние, хотя и дадут эффект быстрого связывания углекислого газа в первые годы, но потом будут заменяться другими породами (в ходе естественной сукцессии либо благодаря рубкам ухода), при этом их древесина будет гнить и выделять углекислый газ [27].

Качественный уход за лесными культурами (как это требуется согласно Критериям 10.1 и 10.5 стандарта и Руководству по лесовосстановлению ПРО-42952298-017-2024 «Руководство по выполнению требований индикатора 10.1.2 СТО-42952298-001-2022 "Сертификация лесопользования"»), нацеленный на создание хозяйственно ценных молодняков, также опосредованно положительно влияет на климат. Дело в том, что для поддержания жизнеспособности лесной промышленности в целом нужно доступное и качественное сырье, в первую очередь высококачественный хвойный пиловочник.

³⁵ FSC-STD-RUS-02.2-2021 EN. The FSC National Forest Stewardship Standard of Russian Federation

Природопользование

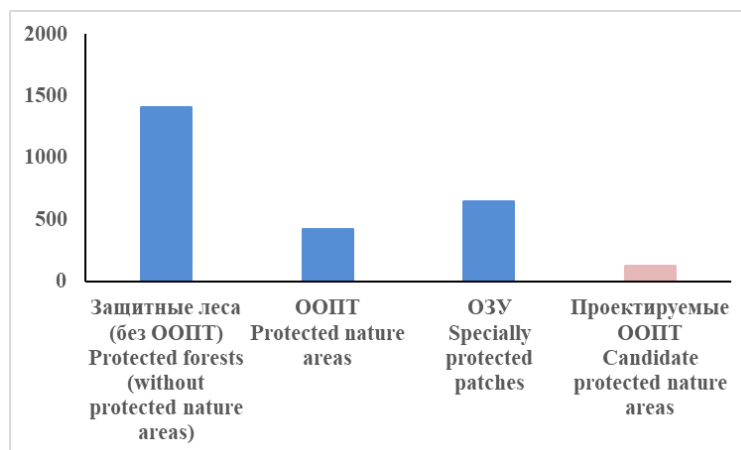


Рисунок 1. Ценные леса, сохраняемые держателями сертификатов системы «Лесной эталон» по законодательству (тыс. га)

Figure 1. Valuable forests that are legally preserved by certificate holders of the Forest Etalon system (thousand hectares)

Источник: собственные расчеты авторов

Source: authors's own calculations

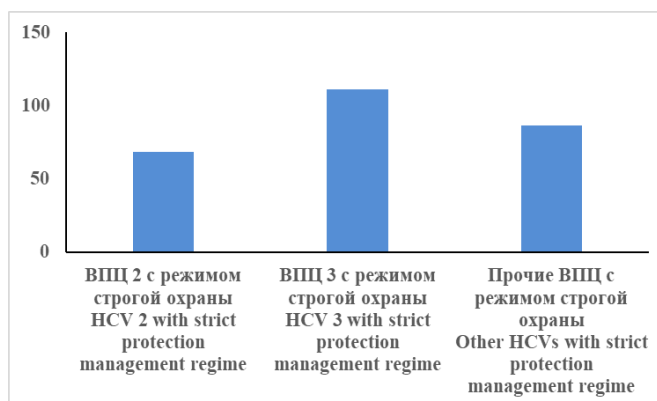


Рисунок 2. Ценные леса, добровольно сохраняемые держателями сертификатов системы «Лесной эталон» (тыс. га)

Figure 2. Valuable forests that are preserved by certificate holders of the Forest Etalon system (thousand hectares) on a voluntary basis

Источник: собственные расчеты авторов

Source: authors's own calculations

В соответствии со сложившимися международными представлениями [13] и, в частности, методологией Verra, а также российской методологией (Методология реализации климатического проекта № 0010 «Лесовосстановление») формирование многопородных и разновозрастных лесов, а также рубки ухода, направленные на повышение продуктивности насаждения, рассматриваются и в качестве приема ЛКП. Следует учитывать, что климатический эффект лесовосстановления также тесно связан с тем, какие существуют требования и к собственно заготовке древесины.

Снижение воздействия лесозаготовок

Положительное влияние на климат оказывают и обязательные требования по сохранению так называемых ключевых биотопов (или ключевых местообитаний) на лесосеках (Критерии 6.1, 6.3, 6.4, 6.6, 6.8, 10.11, Приложение С. Типы ключевых местообитаний, выделяемых на лесосеках в ходе заготовки древесины, и меры по их охране). Это различные элементы исходной лесной среды, в которых с высокой вероятностью могут встречаться редкие виды животных и растений. Они очень разнообразны, но их перечень включает, в том

числе, старые деревья, возраст которых заметно превосходит средний возраст господствующего полога, а также сухостой, валеж, небольшие водно-болотные угодья и др. Их основная цель – сохранение биологического разнообразия. Но, как видно из приведенных примеров, они вносят лепту и в депонирование углерода. В одном сохраненном крупном старом дереве (если помимо ствольной древесины учесть, ветки, листья или хвою, корни) может быть депонировано 1,5-2,0 т углерода. Сухостой и валеж, просто оставленные на лесосеке, также будут гнить медленнее, чем если их, например, свалить или распилить. К тому же их распиловка и уборка – это тоже затраты ресурсов, в частности топлива для техники, а значит, дополнительные выбросы. Так что, чем больше сохранять таких биотопов на лесосеке, тем лучше и для климата. Для лесосек площадью более 15 га есть гораздо более серьезное требование (Критерий 6.8) – на каждой такой лесосеке требуется сохранить мозаичный лесной ландшафт в виде ветроустойчивых полос и куртин леса, причем доля оставляемых полос и куртин должна составлять не менее 10% от площади лесосеки. Очевидно, что это требование «льет воду на ту же мельницу»: чем больше на лесосеке оставлено, не тронуто, не вывезено, тем меньше выбросы углекислого газа.

В соответствии со сложившимися международными представлениями [13] и, в частности, методологией Verra, сохранение части деревьев при заготовке древесины в качестве элемента будущего леса и КДО, бережное отношение к оставляемым деревьям, минимизация воздействия на почвы, оставление в лесу порубочных остатков и крупных древесных остатков, а также меры, способствующие формированию многопородных и разновозрастных лесов, рассматривается и в качестве приема ЛКП.

Снижение рисков возникновения лесных пожаров

В соответствии со сложившимися международными представлениями [13] и, в частности, методологией Verra, а также российской методологией (№ 0011 «Улучшенное управления лесным хозяйством, в том числе охрана лесов от пожаров», 2023), управление горючими материалами и в целом меры по снижению рисков природных пожаров рассматриваются в качестве приема УУЛ.

В системе «Лесной эталон» от держателей сертификатов требуется, во-первых, оценивать риски опасных природных явлений, включая пожары, а также принимать меры по снижению рисков негативных последствий этих природных явлений. Наконец, недавно система «Лесной эталон» утвердила обязательное ПРО-42952298-018-2024 «Руководство по пожарам», которое вводит

запрет на сжигание порубочных остатков на лесосеках держателями сертификатов начиная с 1 января 2026 г. К принятию такого решения систему побудили результаты исследований, подтверждающие, что сжигание порубочных остатков на лесосеках после вырубок существенно повышает риски возникновения лесных пожаров [28]. Однако этот метод очистки лесосек все еще применяется лесозаготовителями и периодически приводит к пожарам. Начиная с 2026 года у арендаторов, сертифицированных по системе «Лесной эталон», таких пожаров возникать не должно.

Обсуждение

По данным Н.В. Лукиной с коллегами (2023) [29], участки малонарушенных (старовозрастных) лесов содержат больше всего углерода в связанном состоянии на единицу площади по сравнению с участками тех же типов, но меньшего возраста. Дело в том, что с возрастом биологическая емкость леса, как правило, повышается. В числе прочего это означает, что количество всей биомассы (растений, животных, а также органических остатков) на единице площади в старовозрастных лесах выше – а значит, выше и количество связанного углерода. При этом так называемый возраст спелости насаждения, при достижении которого можно начинать рубки с целью заготовки древесины, обычно сильно ниже максимального для данной породы, иногда на несколько столетий.

Далее, в старовозрастных лесах, как правило, в составе участвует несколько или даже много пород, имеются деревья разного возраста, присутствуют кустарники. Деревья достигают максимального возраста и размера, потом естественным образом отмирают, поэтому в таком лесу всегда в значительном количестве присутствуют крупные древесные остатки (КДО) – сухостой, валеж, зависшие стволы, пни, крупные ветви и корни. Все это приводит к тому, что в единице пространства в старовозрастном лесу «помещается» максимальное количество растительной биомассы, как живой (фитомассы), так и мертвой (фитодетрита), а значит, в нем сохраняется в связанном виде наибольшее количество углерода. КДО по вкладу в общий запас углерода в малонарушенных таежных лесах сравнимы с фитомассой [30]. Если в диком таежном лесу не вести никаких рубок, даже санитарных, разложение КДО происходит очень медленно, в течение десятилетий или даже столетий, особенно крупного валежа или пней. Это означает, что эмиссия углекислого газа оказывается сильно растянута во времени, и ее компенсирует поглощение углерода растущими молодыми

деревьями. Как указывала Э.Ф. Ведрова (2018) [30], в результате старовозрастные таежные леса, как правило, не становятся источником углерода (даже при высоком уровне накопления фитодетрита), а накопленные ими КДО играют роль «хранителя» углерода в экосистеме. Напротив, чем больше запас связанного углерода в насаждении, тем выше может быть эмиссия углекислого газа в результате рубки за счет усиления гетеротрофного (микробного) дыхания почвы. Разложение древесных остатков, включая порубочные, и органического вещества почвы ускоряется в результате изменения условий на вырубке, прежде всего, повышения температуры за счет попадания большего количества солнечного света.

Соответственно, запрет на рубки в таких лесах позволяет избежать большей эмиссии углекислого газа, чем отказ от рубок более молодых насаждений, в которых деревья первого поколения еще не достигли предельного возраста.

Стоит критически отнестись к до сих пор встречающимся утверждениям, что старовозрастные леса не накапливают связанный углерод, а, наоборот, служат источниками углекислого газа, так как в них процессы разложения биомассы преобладают над процессами ее накопления. Это не так, и имеется немало работ, содержащих доказательства накопления углерода в старовозрастных лесах [29]. В немалой степени это связано с тем, что почвы малонарушенных лесов являются открытыми системами и продолжают накапливать углерод.

Недавний анализ С. Беснара с коллегами (2025) [27] на основе большого массива данных о глобальной динамике участков лесов разного возраста за период с 2010 по 2020 годы и спутниковых данных о надземных запасах углерода и о чистом потоке CO₂ продемонстрировал, что с точки зрения стратегии лесопользования, нацеленной на накопление углерода и противодействие изменению климату, сохранение старовозрастных лесов для климата лучше, чем выращивание на их месте молодых. Так, в результате замены старовозрастных лесов (старше 200 лет) на молодые (с возрастом младше 20 лет) ежегодные потери углерода составляли 0,14 млрд т. А запасы углерода в надземной биомассе в ненарушенных старовозрастных лесах оказались выше, чем в любых других классах возраста нарушенных лесов: на 230% больше, чем в молодых, на 160% больше, чем в приспевающих и на 54% больше, чем в спелых.

Также следует указать, что малонарушенные леса обладают высоким потенциалом адаптации к изменениям климата в силу того, что они способны к самоподдержанию. Например, особенностью малонарушенных лесных

территорий является то, что они, в силу большого размера (более 50 тыс. га), высокой пространственной неоднородности внутренней структуры и долговременной естественной динамики процессов обладают более высокой устойчивостью и способны существовать в течение длительного времени в отсутствии катастрофических нарушений [31].

Дополнительный вклад в сокращение эмиссии углерода вносит то обстоятельство, что массивы старовозрастных и малонарушенных лесов, как правило, находятся в отдалении от населенных пунктов и мест производства. Это означает, что расстояние для вывозки древесины велико, а значит, при транспортировке выделяется больше парниковых газов. Если же для освоения этих массивов требуется строительство дорог, то выбросы увеличиваются в разы. Отказ от рубок удаленных участков старовозрастных лесов вынуждает предприятия увеличивать заготовки в близко расположенных староосвоенных лесах с уже развитой дорожной сетью, путем интенсификации лесного хозяйства. В общем случае это тоже снижает выбросы.

С нашей точки зрения сохранение малонарушенных (старовозрастных) лесов, которое требуется по стандарту лесопользования системы «Лесной эталон», одновременно является и наиболее эффективным приемом УУЛ. Предотвращенную эмиссию парниковых газов можно оценить количественно, используя общепризнанные методы для оценки запаса накопленного углерода на сохраняемом лесном участке. Также целесообразно, чтобы и государственные российские методологии улучшенного управления лесами рассматривали бы сохранение малонарушенных (старовозрастных) лесов в качестве основного приема УУЛ. Это было бы в русле международной практики, где почти 60% углеродных единиц формируется в рамках на проекты по сохранению и восстановлению экосистем [32].

Формирование участков продуктивных лесных культур хозяйственно ценных пород согласно требованиям стандарта системы «Лесной эталон» вполне может считаться приемом УУЛ. При этом следует учитывать, что обеспечение разнообразия породного состава древостоя является залогом более высокой устойчивости древостоя в будущем, в том числе к природным рискам, которые растут по мере глобального потепления, например, повышению частоты и интенсивности лесных пожаров (подробнее см. [3]), вспышек размножения насекомых и болезней леса, различных опасных гидрометеорологических явлений – засух, наводнений, ураганных ветров (о преимуществах смешанных насаждений по сравнению с хвойными

монокультурами с точки зрения выполнения лесами экосистемных услуг см. [8, 9]. Поэтому требованиям к УУЛ вполне могут соответствовать любые многопородные продуктивные насаждения, полученные держателями сертификатов в рамках воспроизводства лесов, вне зависимости от метода лесовосстановления. Например, этого можно достичь путем сохранения ключевых биотопов при сплошных рубках и обеспечения мозаичности (неоднородности) среды на вырубках. Для оценки объема накопления древесины в растущих лесных культурах и объемов древесины, сохраняемых при сплошных рубках, можно использовать общепринятые методики. Однако, в целом методику количественной оценки вклада высокопродуктивных насаждений в увеличение поглощающего потенциала российских лесов и учета их адаптационной способности в долгосрочной перспективе еще предстоит разработать.

Управление горючими материалами и в целом меры по снижению рисков природных пожаров являются приемом УУЛ. Подходы к оценке их эффективности требуют дальнейшего обсуждения и должны рассматриваться в связке с мерами по повышению адаптационного потенциала лесов, в том числе с точки зрения снижения рисков пожаров в будущем, например, формируя смешанные насаждения.

Заключение

Многие приемы УУЛ, которые используются в ЛКП с целью обеспечения значимого и измеримого сокращения выбросов парниковых газов или увеличения поглотительной способности лесов, присутствует в стандартах систем добровольной лесной сертификации. На примере стандарта системы «Лесной эталон» и лесозаготовительной и лесохозяйственной деятельности организаций, сертифицированных в данной системе, можно сказать, что критериям УУЛ соответствуют требования по сохранению ценных лесов (особенно малонарушенных и старовозрастных), созданию лесных культур хозяйственно ценных пород, сохранение ключевых биотопов (крупных деревьев, деревьев редких пород, крупных древесных остатков и т.д.) и сохранению мозаичности ландшафта при заготовке древесины и др., а также меры по снижению риска лесных пожаров. Такие меры реализуются с самого начала функционирования системы (первые

сертификаты лесопользования были выданы в 2023 году), а, фактически, в связи с тем, что данная система фактически использует стандарт и процедуры международной схемы FSC, то с 2000 года, когда был выдан первый сертификат лесопользования FSC в России. Таким образом можно говорить, что за данный период о накопленном положительном эффекте. В настоящий момент держатели сертификатов должны подтверждать, что они соответствуют требованиям стандарта. Чтобы избежать риска гринвошинга, лесозаготовительная компания, имеющая сертификат ДЛС и желающая себя позиционировать в качестве климатически ответственной, должна продемонстрировать дополнительный эффект своей деятельности с точки зрения смягчения последствий изменения климата и наладить мониторинг соответствующих показателей. Например, вполне можно количественно оценить объем предотвращенной эмиссии парниковых газов в результате реализации мер строгой охраны лесов с высокими природоохранными ценностями (ВПЦ), снижения ущерба от лесных пожаров, сохранения ключевых местообитаний при сплошных рубках и пр. Для количественной оценки влияния приемов УУЛ на депонирование углерода и сокращение эмиссии парниковых газов в рамках ДЛС можно воспользоваться стандартными методологиями, принятыми в ЛКП. Существует такой опыт и для компаний, имевших сертификат ДЛС [26]. Однако, в этом случае нужно четко оговорить базовую линию, с которой проводится сравнение – обычными условиями ведения бизнеса. Нужно понимать, что количественные оценки размера виртуального «углеродного кредита» в рамках ДЛС могут отличаться от тех, которые приняты в рамках международных ЛКП.

Использование ДЛС в качестве добровольного климатически-ориентированного инструмента может значительно повысить поглотительный потенциал российских лесов. Однако, эффективность использования данного механизма будет зависеть от того, удастся через тонкую настройку нормативно-правовой базы ЛКП, повысить их синергию с ДЛС. В частности, необходимо, чтобы государственные российские методологии улучшенного управления лесами, следуя международным тенденциям, рассматривали бы сохранение малонарушенных (старовозрастных) лесов в качестве основного приема УУЛ.

Список литературы

1. Girona M.M., Aakala T., Aquilué N., Bélisle A.-C., Chaste E., Danneyrolles V. et al. Challenges for the sustainable management of the boreal forest under climate change / M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron (eds) // *Boreal Forests in the Face of Climate Change. Advances in Global Change Research*. Springer, Cham., 2023; 74: 773–837. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_31.
2. Gibbs D.A., Rose M., Grassi G., Melo J., Rossi S., Heinrich V., Harris N.L. Revised and updated geospatial monitoring of 21st century forest carbon fluxes // *Earth System Science Data*. 2025; 17 (3): 1217–1243, DOI 10.5194/essd-17-1217-2025. – URL: <https://essd.copernicus.org/articles/17/1217/2025/>.
3. Abatzoglou, J.T., Kolden, C.A., Cullen, A.C. et al. Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally // *Nat. Commun*. 2025; 16: 6390. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61608-1>.
4. MacCarthy J., Tyukavina A., Weisse M.J., Harris N., Glen E. Extreme wildfires in Canada and their contribution to global loss in tree cover and carbon emissions in 2023 // *Glob. Chang. Biol*. 2024; 30 (6): e17392. doi: 10.1111/gcb.17392. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.17392>.
5. Romanov A.A., Tamarovskaya A.N., Gloor E., Brien R., Gusev B.A., Leonenko E.V., Vasiliev A.S., Krikunov E.E. // *Sci. Total Environ*. 2022; Nov 10 846: 157322. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157322. Epub 2022 Jul 22. PMID: 35872207. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722044205?via%3Dihub>.
6. Шварц Е.А., Шматов Н.М., Карпачевский М.Л., Байбар А.С. Вызовы и проблемы реформирования лесного хозяйства России // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2022. – Вып. 241. – С. 157-172.
7. Shvarts E.A., Karpachevskiy M.L., Shmatkov N.M., Baybar A.S. Reforming forest policies and management in Russia: problems and challenges // *Forests*. 2023. Vol. 14 (8): 1524. DOI: 10.3390/f14081524. <https://elibrary.ru/item.asp?id=62429555>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50232175>.
8. Verkerk P.J., Costanza R., Hetemäki L., Kubiszewski I., Leskinen P., Nabuurs G.J., Potočník J., Palahí M. Climate-Smart Forestry: the missing link // *Forest Policy and Economics*. 2020; Vol. 115: 102164, ISSN 1389-9341, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934120300630>.
9. Huuskonen S, Domisch T, Finér L, Hantula J, Hynynen J, Matala J, Miina J, Neuvonen S, Nevalainen S, Niemistö P, et al. 2021. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *For Ecol Manag*. 479: 118558. doi:10.1016/j.foreco.2020.118558.
10. Константинов А.В., Бурцев Д.С., Гаврилюк Е.С., Королева Т.С., Торшукова З.А. Динамика количественного распределения видов адаптационных мероприятий и затрат на их проведение в лесах России в условиях изменений климата // *Лесотехнический журнал*. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 456-472. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27>.
11. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hasegawa M., Lerink B. (eds.). Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute. 2020. 137 p. <https://doi.org/10.36333/wsctu11>.
12. Романовская А.А. Подходы к реализации экосистемных климатических проектов в России // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2023. – Т. 87. – № 4. – С. 463-478. – DOI 10.31857/S2587556623040118. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54378903>.
13. Kaarakka L., Cornett M., Domke G., Ontl T., Dee L.E. Improved forest management as a natural climate solution: A review // *Ecol Solut Evid*. 2021; 2: e12090. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12090>.
14. Коротков В.Н. Лесные климатические проекты в России: ограничения и возможности // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 39–46. DOI: 10.21685/2500-0578-2022-4-3. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50385462>.

15. Природные климатические решения. Обзор международных подходов. – Департамент многостороннего экономического сотрудничества и специальных проектов Минэкономразвития России. М. – 2022. – URL: https://economy.gov.ru/material/departments/d30/obzory_i_analitika/obzor_po_prirodnym_klimaticheskim_resheniyam.htm (дата обращения: 10.12.2025).
16. California Air Resources Board. Compliance offset protocol U.S. forest projects. California Environmental Protection Agency, 2015. – URL: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/capandtrade/protocols/usforest/forestprotocol2015.pdf>.
17. Коротков В.Н. Проблемные аспекты реализации лесоклиматических проектов в России // Презентация на Круглом столе «Лесоклиматические проекты: российский и международный опыт», 21 марта 2025 г. – URL: http://www.igce.ru/wp-content/uploads/2025/03/Korotkov_2025-03-21.pdf (дата обращения: 10.12.2025).
18. Экономический потенциал природно-климатических проектов для получения углеродных единиц существенно ниже, чем предполагалось ранее. – URL: <http://www.igras.ru/news/4180> (дата обращения: 10.12.2025).
19. Антонова Н.Е., Дзюба Н.А. Лесоклиматические проекты как новый приоритет стратегического развития лесного комплекса региона // Регионалистика. – 2024. – Т. 11. – № 1. – С. 5-23. DOI: 10.14530/reg.2024.1.5. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65613045>.
20. McDermott C.L., Elbakidze M., Teitelbaum S., Tysiachniouk M. Forest certification in boreal forests: current developments and future directions / M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron (eds) // Boreal forests in the face of climate change. Advances in Global Change Research. Springer, Cham. 2023; 74: 533-553. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_21.
21. Teitelbaum S., Tysiachniouk M., McDermott C. et al. Articulating FPIC through transnational sustainability standards: A comparative analysis of Forest Stewardship Council's standard development processes in Canada, Russia and Sweden // Land Use Policy. 2021; 109: 105631. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105631>.
22. Elbakidze M., Dawson L., McDermott C.L., Teitelbaum S., Tysiachniouk M. 2022. Biodiversity conservation through forest certification: key factors shaping national Forest Stewardship Council (FSC) standard-development processes in Canada, Sweden, and Russia // Ecology and Society. 2022; 27 (1): 9. <https://doi.org/10.5751/ES-12778-270109>. – URL: <https://ecologyandsociety.org/vol27/iss1/art9/>.
23. Tysiachniouk M.S., McDermott C.L., Kulyasova A.A., Teitelbaum S., Elbakidze M. The politics of scale in global governance: Do more stringent international forest certification standards protect local rights in Russia? // Forest Policy and Economics. 2021; 125: 102407. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102407>. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934121000137>.
24. Zwerts J.A., van der Linde C.M., Praamstra G.J., Schipper J., Trolliet F., Waeber P.O., Garcia C.A. Feasibility and effectiveness of global intact forest landscape protection through forest certification: the conservation burden of intact forest landscapes // Front. For. Glob. Change. 2024; 7: 1335430. doi: 10.3389/ffgc.2024.1335430.
25. Teitelbaum S., Asselin H., Bissonnette J.-F., Blouin D. Governance in the boreal forest: what role for local and indigenous communities? / M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron (eds) // Boreal forests in the face of climate change. Advances in Global Change Research. – Springer, Cham. 2023; 74: 513-522. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_20.
26. Антонова Н.Е., Ломакина Н.В. Возможности реализации и потенциального влияния ESG-политики в ресурсной экономике Дальневосточного федерального округа // Власть и управление на Востоке России. – 2022. – № 4 (101). – С. 45–58. <https://doi.org/10.22394/1818-4049-2022-101-4-45-58>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50105255>. EDN ZJDRKG,
27. Besnard S., Heinrich V.H.A., Carvalhais N. et al. Global covariation of forest age transitions with the net carbon balance. Nat. Ecol. Evol. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02821-5>. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41559-025-02821-5#citeas>.

28. Петренко Ю.Б., Бондаренко А.Д. Исследование причин пожаров в Приангарье // Устойчивое лесопользование. – 2022. – № 2. – С. 34-42. https://doi.org/10.47364/2308-541x_2022_69_2_342022.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49291052>
29. Лукина Н.В., Барталев С.А., Гераскина А.П., Плотникова А.С., Горнов А.В., Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Кузнецова А.И., Шевченко Н.Е., Тихонова Е.В., Данилова М.А., Тебенькова Д.Н., Смирнов В.Э., Ручинская Е.В. Роль старовозрастных лесов в аккумуляции и хранении углерода. Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – 87(4). – С. 536–557. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040064>.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54378907>.
30. Ведрова Э. Ф., Мухортова Л. В., Трефилова О. В. Участие старовозрастных лесов в бюджете углерода бореальной зоны Центральной Сибири // Изв. РАН. Сер. биол. – 2018. – № 3. – С. 326–336.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34902197>.
31. Potapov P., Yaroshenko A., Turubanova S., Dubinin M. et al. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. Ecology and Society. 2008; 13 (2): 51. – URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art51/>.
32. Shvarts E.A., Ptichnikov A.V., Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Baybar A.S. The low-carbon development strategy of Russia until 2050 and the role of forests in its implementation. Sustainability. 2025; 17: 6917. <https://doi.org/10.3390/su17156917>.

References

1. Girona M.M., Aakala T., Aquilué N., Bélisle A.-C., Chaste E., Danneyrolles V. et al. Challenges for the sustainable management of the boreal forest under climate change. M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron (eds). Boreal Forests in the Face of Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer, Cham, 2023; 74: 773–837. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_31.
2. Gibbs D.A., Rose M., Grassi G., Melo J., Rossi S., Heinrich V., Harris N.L. Revised and updated geospatial monitoring of 21st century forest carbon fluxes. Earth System Science Data. 2025; 17 (3): 1217–1243, DOI 10.5194/essd-17-1217-2025. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/17/1217/2025/>.
3. Abatzoglou, J.T., Kolden, C.A., Cullen, A.C. et al. Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. Nat. Commun. 2025; 16: 6390. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61608-1>.
4. MacCarthy J., Tyukavina A., Weisse M.J., Harris N., Glen E. Extreme wildfires in Canada and their contribution to global loss in tree cover and carbon emissions in 2023. Glob. Chang. Biol. 2024; 30 (6): e17392. doi: 10.1111/gcb.17392. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.17392>.
5. Romanov A.A., Tamarovskaya A.N., Gloor E., Brienen R., Gusev B.A., Leonenko E.V., Vasiliev A.S., Krikunov E.E. // Sci. Total Environ. 2022; Nov 10 846: 157322. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157322. Epub 2022 Jul 22. PMID: 35872207. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722044205?via%3Dihub>.
6. Shvarts E.A., Shmatkov N.M., Karpachevskiy M.L., Baibar A.S. *Výzovy i problémy reformirovaniya lesnogo sektora Rossii* [Challenges and problems of reforming the forestry sector in Russia]. Izvestia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoy akademii, 2022; 241: 157–172 (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.157-172. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50232175>.
7. Shvarts E.A., Karpachevskiy M.L., Shmatkov N.M., Baybar A.S. Reforming forest policies and management in Russia: problems and challenges. Forests. 2023; 14 (8): 1524. DOI: 10.3390/f14081524. <https://elibrary.ru/item.asp?id=62429555>.
8. Verkerk P.J., Costanza R., Hetemäki L., Kubiszewski I., Leskinen P., Nabuurs G.J., Potočník J., Palahí M. Climate-Smart Forestry: the missing link // Forest Policy and Economics. 2020; Vol. 115: 102164, ISSN 1389-9341, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934120300630>.

9. Huuskonen S, Domisch T, Finér L, Hantula J, Hynynen J, Matala J, Miina J, Neuvonen S, Nevalainen S, Niemistö P, et al. 2021. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? For Ecol Manag. 479: 118558. doi:10.1016/j.foreco.2020.118558.
10. Konstantinov A.V., Burtcev D.S., Gavriluk E.S., Koroleva T.S., Torshukova Z.A. (2025). Dynamics of quantitative distribution of types of adaptation measures and costs for their implementation in Russian forests under climate change conditions. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 456-472 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27>.
11. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B. (eds.). Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute. 2020. 137 p. <https://doi.org/10.36333/wscu11>.
12. Romanovskaya A.A. *Podkhody k realizatsii ekosistemnykh klimaticheskikh projektiv* [Approaches to implementing ecosystem climate projects in Russia]. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2023; 87 (4): 463-478. (In Russ.). DOI 10.31857/S2587556623040118. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54378903>.
13. Kaarakka L., Cornett M., Domke G., Ontl T., Dee L.E. Improved forest management as a natural climate solution: A review. Ecol. Solut. Evid. 2021; 2: e12090. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12090>.
14. Korotkov V.N. *Lesnye klimaticheskie proekty v Rossii: ogranicheniya i vozmozhnosti* [Forest climate projects in Russia: constraints and opportunities]. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2022; 7. 4: 39–46. DOI: 10.21685/2500-0578-2022-4-3. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50385462>.
15. *Prirodnye klimaticheskie resheniya. Obzor vzhedunarodnykh podkhodov* [Nature-based solutions. A review of international approaches. Departament mnogostoronnego ekonomicheskogo sotrudnichestva Minekonomrazvitiya Rossii = Department of multi-sided economic collaboration and special projects of Ministry for Economic Development of Russia. Moscow. 2022. (In Russ.). URL: https://economy.gov.ru/material/departments/d30/obzory_i_analitika/obzor_po_prirodnym_klimaticheskim_resheniyam.htm (accessed on December 10 2025).
16. California Air Resources Board. Compliance offset protocol U.S. forest projects. California Environmental Protection Agency, 2015. URL: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/capandtrade/protocols/usforest/forestprotocol2015.pdf>.
17. Korotkov V.N. *Problemnye aspekty realizatsii lesoklimaticheskikh proektov v Rossii* [Problematic aspects of realization of forest climate projects in Russia]. Presentation at the Roundtable “Forest climate projects: Russian and international experience”, March 21 2025. (In Russ.). URL: http://www.igce.ru/wp-content/uploads/2025/03/Korotkov_2025-03-21.pdf (accessed on December 10 2025).
18. *Ekonomicheskii potentsial prirodno-klimaticheskikh proyektov dlya poluchniya uglerodnykh edinits sushchestvenno nizhe, chem predpolagalos' ranee* [Economic potential of nature climate projects for obtaining carbon units is significantly lower than it was assumed before]. (In Russ.). URL: <http://www.igras.ru/news/4180> (accessed on December 10 2025).
19. Antonova N.E., Dzyuba N.A. *Lesoklimaticheskie proyekty kak novyi prioritet strategicheskogo razvitiya lesnogo kompleksa regiona* [Forest climate projects as a new priority for the strategic development of the region's forest complex]. Regionalistika. 2024; 11 (1): 5-23. DOI: 10.14530/reg.2024.1.5. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65613045>.
20. McDermott C.L., Elbakidze M., Teitelbaum S., Tysiachniouk M. Forest certification in boreal forests: current developments and future directions / M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron (eds). Boreal forests in the face of climate change. Advances in Global Change Research. Springer, Cham. 2023; 74: 533-553. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_21.
21. Teitelbaum S., Tysiachniouk M., McDermott C. et al. Articulating FPIC through transnational sustainability standards: A comparative analysis of Forest Stewardship Council's standard development processes in Canada, Russia and Sweden. Land Use Policy. 2021; 109: 105631. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105631>.

22. Elbakidze M., Dawson L., McDermott C.L., Teitelbaum S., Tysiachniouk M. 2022. Biodiversity conservation through forest certification: key factors shaping national Forest Stewardship Council (FSC) standard-development processes in Canada, Sweden, and Russia. *Ecology and Society*. 2022; 27 (1): 9. <https://doi.org/10.5751/ES-12778-270109>. URL: <https://ecologyandsociety.org/vol27/iss1/art9/>.
23. Tysiachniouk M.S., McDermott C.L., Kulyasova A.A., Teitelbaum S., Elbakidze M. The politics of scale in global governance: Do more stringent international forest certification standards protect local rights in Russia? *Forest Policy and Economics*. 2021; 125: 102407. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102407>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934121000137>.
24. Zwerts J.A., van der Linde C.M., Praamstra G.J., Schipper J., Trolliet F., Waeber P.O., Garcia C.A. Feasibility and effectiveness of global intact forest landscape protection through forest certification: the conservation burden of intact forest landscapes. *Front. For. Glob. Change*. 2024; 7: 1335430. doi: 10.3389/ffgc.2024.1335430.
25. Teitelbaum S., Asselin H., Bissonnette J.-F., Blouin D. Governance in the boreal forest: what role for local and indigenous communities? M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron (eds). *Boreal forests in the face of climate change. Advances in Global Change Research*. Springer, Cham. 2023; 74: 513-522. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_20.
26. Antonova N.E., Lomakina N.V. Vozmozhnosti realizatsii i potentsial'nogo vliyaniya ESG-politiki v resursnoi ekonomike Dal'nevostochnogo federal'nogo okruga [Possibilities for e implementation and potential impact of the ESG policy in the resource economy of the Far-Eastern federal district]. *Power and Administration in the East of Russia*. 2022. No. 4 (101). Pp. 45–58. <https://doi.org/10.22394/1818-4049-2022-101-4-45-58>. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50105255>. EDN ZJDRKG.
27. Besnard S., Heinrich V.H.A., Carvalhais N. et al. Global covariation of forest age transitions with the net carbon balance. *Nat. Ecol. Evol.* 2025. <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02821-5>. URL: <https://www.nature.com/articles/s41559-025-02821-5#citeas>.
28. Petrenko Yu.B., Bondarenko A.D. *Isledovanie prichin pozharov v Priangarye* [A study of the causes of fires in Priangarye]. *Ustoichivoe lesopol'zovanie*. 2022; 2; C. 34-42. https://doi.org/10.47364/2308-541x_2022_69_2_342022. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49291052>
29. Lukina N.V., Bartalev S.A., Geras'kina A.P., Plotnikova A.S., Gornov A.V., Ershov D.V., Gavriluk E.A., Kuznetsova A.I., Shevchenko N.E., Tikhonova E.V., Danilova M.A., Teben'kova D.N., Smirnov V.E., Ruchinskaya E.V. Rol' starovozrastnykh lesov v akumul'yatsii i khranении ugleroda [Role of old growth forests in accumulation and storage of carbon]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2023; 87 (4): 536-557. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556623040064>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54378907>
30. Vedrova E.F., Mukhortova L.V., Trefilova O.V. *Uchastie starovozrastnykh lesov v byudzhete ugleroda boreal'noi zony Tsentral'noi Sibiri* [Contribution of old growth forests to the carbon budget of the boreal zone in Central Siberia]. *Izvestiya rossiyskoi Akademii Nauk. Seriya biologicheskaya*. 2018; 3: 326–336. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34902197>.
31. Potapov P., Yaroshenko A., Turubanova S., Dubinin M. et al. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecology and Society*. 2008; 13 (2): 51. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art51/>.
32. Shvarts E.A.; Ptichnikov A.V., Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Baybar A.S. The low-carbon development strategy of Russia until 2050 and the role of forests in its implementation. *Sustainability*. 2025; 17: 6917. <https://doi.org/10.3390/su17156917>.

Природопользование

Сведения об авторах

✉ *Карпачевский Михаил Львович* – кандидат биол. наук, менеджер по управлению проектами системы добровольной лесной сертификации «Лесной эталон», ул. 2-я Брестская, д. 46, стр. 1, эт.3, оф. 6, г. Москва, Российская Федерация, 125047, ORCID: 0000-0002-9585-6228, e-mail: m.karpachevskiy@forest-etalon.ru.

Яницкая Татьяна Олеговна – заместитель директора системы добровольной лесной сертификации «Лесной эталон», ул. 2-я Брестская, д. 46, стр. 1, эт.3, оф. 6, г. Москва, Российская Федерация, 125047, e-mail: t.yanitskaya@forest-etalon.ru.

Шматков Николай Михайлович – директор добровольной лесной сертификации «Лесной эталон», ул. 2-я Брестская, д. 46, стр. 1, эт. 3, оф. 6, г. Москва, Российская Федерация, 125047, главный редактор журнала «Устойчивое лесопользование», e-mail: n.shmatkov@forest-etalon.ru.

Шварц Евгений Аркадьевич – руководитель Центра ответственного природопользования ИГ РАН, профессор ф-та географии и геоинформационных технологий ВШЭ, доктор географических наук, заслуженный эколог РФ. Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, каб. 10, г. Москва, Российская Федерация, 119017, ORCID: 0000-0002-6828-4367, e-mail: e.a.shvarts@igras.ru.

Information about the authors

✉ *Mikhail L. Karpachevskiy* – PhD (Biology), Projects manager at Voluntary Forest Certification System Forest Etalon. 2-ya Brestskaya str. 46, b. 1, floor 3, office 6, Moscow, Russian Federation, 125047. SPIN RSCI: 1988-9773, ORCID: 0000-0002-9585-6228. E-mail: m.karpachevskiy@forest-etalon.ru.

Tatyana O. Yanitskaya – Deputy director at Voluntary Forest Certification System Forest Etalon. 2-ya Brestskaya str. 46, b. 1, floor 3, office 6. Moscow, Russian Federation, 125047. E-mail: t.yanitskaya@forest-etalon.ru.

Nikolai M. Shmatkov – Director of Voluntary Forest Certification System Forest Etalon, editor-in-chief of the journal “Sustainable Forest Management”. 2-ya Brestskaya str. 46, b. 1, floor 3, office 6, Moscow, Russian Federation, 125047. SPIN RSCI: 3123-8851. E-mail: n.shmatkov@forest-etalon.ru.

Evgeny A. Shvarts – DSc (Geography), Head of Center for responsible use of natural resources. Staromonetny lane 29, room. 10, Moscow, Russian Federation, 119017. IG RAS; Professor, Faculty of Geography and Geoinformation Technologies, HSE, Honored Ecologist of Russian Federation, ORCID: 0000-0002-6828-4367, e-mail: e.a.shvarts@igras.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author



Комплексная оценка эффективности озеленения объектов ландшафтной архитектуры (на примере г. Архангельска)

Андрей А. Валекжанин, valekzhanin13@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2302-6129>

Наталья Р. Сунгурова, n.sungurova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Николай А. Бабич, n.babich@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Ольга С. Залывская, o.zalyvsкая@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

Ирина В. Лазарева, lazar0903@mail.ru

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

Зеленые насаждения являются неотъемлемым элементом устойчивой и комфортной городской среды, выполняющим эстетические, экологические и рекреационные функции. Одним из элементов зеленых насаждений является цветочное оформление. Цель исследований – провести комплексную оценку и выявить дисбалансы в системе цветочного оформления г. Архангельска. В статье представлена разработанная и апробированная комплексная методика оценки объектов цветочного оформления городской среды. Комплексная оценка включала экономические, экологические и социологические методы. Согласно проведенной оценке выявлены дисбалансы на примере шести ключевых объектов цветочного оформления г. Архангельска. В ходе исследования была выявлена значительная пространственная дифференциация цветочного оформления в Архангельске: на два центральных округа (Ломоносовский и Октябрьский) приходится 76,84% площади цветочного оформления. Для периферийных округов (Северный, Соломбальский, Варавино-Фактория, Майская горка) характерны меньшие площади цветников (23,16%), ограниченный ассортимент растений (в среднем 4 шт.), что ведет к низким показателям социального восприятия (в среднем 36,76%). Отсутствует прямая зависимость между количеством финансовых затрат и уровнем социального восприятия объектов озеленения. Например, в Ломоносовском территориальном округе самая высокая стоимость 1 м², но уровень социального восприятия средний 49,17%. Выявленные дисбалансы наиболее отчетливо проявляются в периферийных округах, где при схожих с центральными районами затратах (3468,66 и 3486 руб./м²) наблюдается низкий уровень социального восприятия (21,62 и 33,25%). Основными факторами, снижающими уровень социального восприятия цветочного оформления, являются однообразие ассортимента, преобладание однолетних культур, недостаточная выразительность колористических решений. Полученные результаты и разработанная матрица дисбалансов имеют практическую значимость для органов муниципального управления и могут быть использованы при планировании бюджетных расходов, приоритизации объектов озеленения, корректировке ассортиментной политики и разработке мер в рамках реализации национального проекта «Жилье и городская среда».

Ключевые слова: *цветочное оформление, зеленые насаждения, комплексная оценка, объекты ландшафтной архитектуры, устойчивое развитие городов*

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Комплексная оценка эффективности озеленения объектов ландшафтной архитектуры (на примере г. Архангельска) / А. А. Валежжанин, Н. Р. Сунгурова, Н. А. Бабич, О. С. Залывская, И. В. Лазарева // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 247–268. – Библиогр.: с. 264–267 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/16>.

Поступила 23.12.2025. Пересмотрена 29.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Article

Comprehensive assessment of landscaping efficiency landscape architecture objects (using the example of Arkhangelsk)

Andrey A. Valekzhanin, valekzhanin13@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2302-6129>

Natalia R. Sungurova, n.sungurova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

Nikolai N. Babich, n.babich@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

Olga S. Zalyvskaya, o.zalyvskaya@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>

Irina V. Lazareva, lazar0903@mail.ru

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

Green spaces are an integral element of a sustainable and comfortable urban environment, fulfilling aesthetic, ecological and recreational functions. One of the elements of green spaces is floral decoration. The purpose of the research is to conduct a comprehensive assessment and identify imbalances in the flower decoration system in Arkhangelsk. The article presents a developed and tested comprehensive methodology for assessing the objects of floral design of the urban environment. The comprehensive assessment included economic, environmental, and sociological methods. According to the assessment, imbalances were identified using the example of six key objects of flower decoration in Arkhangelsk. The study revealed a significant spatial differentiation of flower decoration in Arkhangelsk: two central districts (Lomonosovsky and Oktyabrsky) account for 76.84% of the flower decoration area. The peripheral districts (Severny, Solombalsky, Varavino-Faktoria, Mayskaya Gorka) are characterized by smaller flower beds (23.16%), a limited range of plants (on average 4 pcs.), which leads to low indicators of social perception (on average 36.76%). There is no direct relationship between the amount of financial costs and the level of social perception of landscaping facilities. For example, the Lomonosov territorial district has the highest cost of 1 m², but the average level of social perception is 49.17%. The identified imbalances are most clearly manifested in peripheral districts, where, with expenses similar to the central districts (3468.66 and 3486 rubles/m²), there is a low level of social perception (21.62 and 33.25%). The main factors reducing the level of social perception of floral design are the uniformity of the assortment, the predominance of annual crops, and the lack of expressiveness of color solutions. The results obtained and the developed matrix of imbalances are of practical importance for municipal authorities and can be used in planning budget expenditures, prioritizing landscaping facilities, adjusting assortment policies and developing measures within the framework of the national project "Housing and Urban Environment".

Keywords: *floral decoration, green spaces, integrated assessment, landscape architecture facilities, sustainable urban development*

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

For citation: Valekzhanin A. A., Sungurova N. R., Babich N. A., Zalyvskaya O. S., Lazareva I. V. (2026). Comprehensive assessment of landscaping efficiency landscape architecture objects (using the example of Arkhangelsk). Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 247–268 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/16>.

Received 23.12.2025. *Revised* 29.01.2026. *Accepted* 15.03.2026. *Published online* 27.03.2026.

Введение

Государства-члены ООН в 2015 году приняли Повестку дня в области устойчивого развития на период до 2030 года³⁶. Повестка-2030 основана на принципе интеграции экономических, социальных и экологических аспектов развития. В ее структуру входят 17 целей и 169 задач, ориентированных на достижение сбалансированного развития территорий. Особое значение для развития городов имеет цель 11 «Устойчивые города и населенные пункты».

В Российской Федерации положения Повестки-2030 официально признаны и интегрированы в систему стратегического планирования, включая федеральные и региональные программы социально-экономического развития. Например, национальный проект «Жилье и городская среда», направленный на формирование комфортной, безопасной и экологически благоприятной городской среды³⁷

Без развития системы зеленых насаждений не достичь целей, указанных в этих стратегических документах. Зеленые насаждения обеспечивают широкий спектр функций: повышение эстетической и рекреационной ценности городских территорий [1], пыле-, ветро- и шумозащита [2], улучшение микроклиматических условий и формирование охлаждающего эффекта [3-4].

В условиях арктической зоны роль зеленых насаждений особенно велика. Зеленые насаждения не только несут утилитарную функцию, но и

эстетическую. Для местного населения зеленые насаждения – это важный индикатор качества жизни и уровня комфортности городской среды [5-9].

В условиях ограниченных ресурсов возрастает необходимость контроля эффективности вложений в озеленение, включая оценку декоративности, устойчивости насаждений, разнообразия ассортимента, уровня ухода и восприятия жителями.

В последние годы отмечается противоречие между объемом финансирования и социально-эстетической отдачей, ведущее к неэффективному использованию бюджетных средств. Например, в работе О.Н. Руссовой [10] приводится умеренного неудовлетворительная оценка текущего состояния урбосистемы.

Все это создает потребность в комплексных методах оценки эффективности зеленых насаждений, в частности цветочного оформления. Результаты комплексного анализа могут стать основой более эффективного планирования бюджета на озеленение. Особенно это актуально для городов арктической зоны, в которых стоимость работ выше, а вегетационный период растений короче.

Цветочное оформление (ЦО) входит в совокупность городских зеленых насаждений. Цветочные культуры формируют визуальный облик городской среды, обеспечивают ее колористическое разнообразие, а также улучшают эстетическое и

³⁶ Повестка-2030 и ЦУР ООН // https://economy.gov.ru/material/directions/vneshneekonimicheskaya_deyatelnost/ustoychivoe_razvitiye/povestka_2030_i_cur_oon/.

³⁷ Национальный проект «Жилье и городская среда» / Правительство Российской Федерации. –

URL: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/zhile-i-gorodskaya-sreda/blagoustroystvo/>.

эмоциональное восприятие общественных пространств. В функционально-планировочном отношении цветочное оформление представляет собой многоуровневую систему цветников, различающихся по типу, стилю, композиционному и колористическому решению, жизненному циклу используемых растений, их биологии и экологии, характеру эмоционального воздействия, а также по условиям эксплуатации и затратам на создание и содержание [11-13].

Хотя цветники занимают небольшую часть общей площади озеленения (от 0,5 до 2,5%), они требуют значительных денежных и трудовых затрат [14]. Это обуславливает необходимость создания цветочного оформления такого высокого качества, которое оправдывало бы эти затраты [15].

Исследования озеленения городов развиваются преимущественно в нескольких направлениях.

Во-первых, изучается экономическая составляющая зеленого строительства, включающая оценку компенсационной стоимости затрат на зеленые насаждения. Компенсационную стоимость рассчитывают, суммируя три группы затрат: прямые расходы на приобретение и посадку растений; затраты на содержание до момента, когда насаждения начнут полноценно выполнять свои функции; корректирующие коэффициенты, которые учитывают местоположение, состояние растений и их ценность для людей [16].

Во-вторых, активно формируются методики оценки экологического состояния и декоративности насаждений, включающие анализ ассортимента, устойчивости к стрессовым факторам [11, 17-19].

В третьем направлении рассматривается восприятие зелёных объектов жителями города. Социологические исследования выявляют удовлетворенность и предпочтения респондентов. Благодаря им респонденты могут сформировать свою позицию, включиться в развитие города и получить информацию о современных тенденциях формирования озеленения [10, 20].

Наконец, в работах по северным городам подчеркивается специфика интродукции растений, климатическая уязвимость и необходимость адаптированных решений [18, 21-22].

Вместе с тем преобладают исследования, сфокусированные на одной группе параметров – экономических, экологических, либо социологических. Такие исследования не позволяют взглянуть на проблему целиком. Таким образом, проводимые нами исследования предлагают комплексную методику обследования объектов цветочного оформления, позволяющую выявить структурные дисбалансы сразу всех факторов.

Цель исследований – провести комплексную оценку и выявить дисбалансы в системе цветочного оформления г. Архангельска через призму экономических, экологических и социологических показателей.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- выполнить сравнительный экономический анализ шести ключевых объектов цветочного оформления (ОЦО) (по НМЦК (начальной (максимальной) цене контрактов), стоимости 1 м²);
- провести оценку их экологическо-планировочного состояния, разнообразия и декоративности видов цветочных растений;
- проанализировать социальное восприятие и удовлетворенность жителей ключевыми объектами;
- обобщить полученные данные и классифицировать объекты по характеру выявленных дисбалансов;
- сформулировать рекомендации для повышения эффективности городского озеленения.

Материалы и методы

Архангельск – это город областного значения, административный центр Архангельской области и Приморского муниципального района. Площадь Архангельска составляет 294,45 км². Деление города на 9 территориальных округов было закреплено Решением Архангельского городского совета народных депутатов № 88 от 15.11.1991 года (таблица 1 и рисунок 1). Для комплексного анализа в каждом территориальном округе, в котором есть цветочное оформление за счет городского бюджета, на основе закупочной документации, были выбраны

Экология

ключевые объекты исследования. Эти цветники занимают наибольшую площадь в территориальном округе (таблица 2 и рисунок 2).

Для комплексной оценки использовали экономические, экологическо-планировочные и социологические методы.

Экономические

Для выявления актуального состояния цветочного оформления городских пространств Архангельска был проведен анализ конкурсных закупок администрации города [[https:// arhcity.rts-tender.ru/](https://arhcity.rts-tender.ru/)] по собственной методике [23], включающей анализ начальных (максимальных) цен контрактов и расчет удельной стоимости (руб./м²) на основе данных с официального портала закупок.

Административно-территориальное деление г. Архангельска

Таблица 1

Administrative-territorial division of Arkhangelsk

Table 1

№	Название территориальных округов	Плотность, чел./км ²	Площадь, км ²	Численность населения, тыс. чел. на 2021 г., чел.	Площадь цветочного оформления 2025, м ²
I	Ломоносовский	8919	7,96	70995	1264,7
II	Октябрьский	2610	31,89	83248	1022,4
III	Северный	2470	9,28	22926	297,8
IV	Соломбальский	1207	27,95	33730	163,71
V	Варавино-Фактория	1641	22,97	37699	165,1
VI	Майская горка	2554	19,4	49540	62,6
VII	Исакогорский	588	58	25671	0
VIII	Цигломенский			8428	0
IX	Маймаксанский	157	117	18374	0
	Всего городского округа	-	294,45	350611	2976,31

Источник: Решение Архангельского городского совета народных депутатов № 88 от 15.11.1991 года

Source: By the decision of the Arkhangelsk City Council of People's Deputies No. 88 dated 15.11.1991

Источник: Решение Архангельского городского совета народных депутатов № 88 от 15.11.1991 года

Source: By the decision of the Arkhangelsk City Council of People's Deputies No. 88 dated 15.11.1991

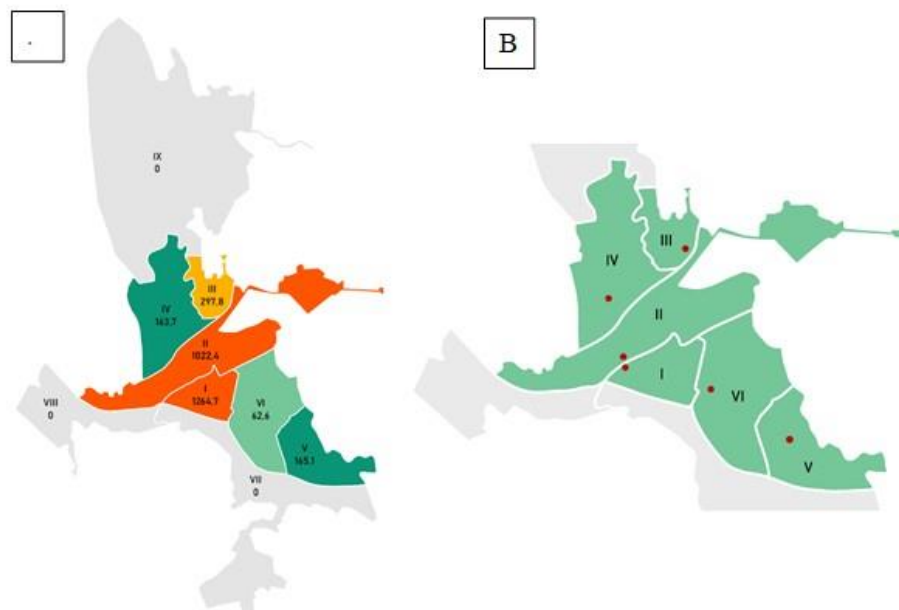


Рисунок 1. Площадь цветочного оформления в 2025 году (м²) (А) и расположение ключевых объектов (В)

Figure 1. The area of floral decoration in 2025 (m²) (A) and the location of key facilities (B)

Источник: Решение Архангельского городского совета народных депутатов № 88 от 15.11.1991 года

Source: By the decision of the Arkhangelsk City Council of People's Deputies No. 88 dated 15.11.1991

Таблица 2

Ключевые объекты исследования

Table 2

Key research objects						
№ / No.	Территориальный округ / Territorial District	Исследуемый объект / Study Object	Координаты / Coordinates	Площадь цветочного оформления, м² / Flower bed area, m²	Доля от цветочного оформления в территориальном округе, % / Share of total flower bed area in the district, %	
I	Ломоносовский / Lomonosovsky	Партер у Администрации ГО «Город Архангельск» / Parterre near the Administration of the Urban Okrug "City of Arkhangelsk"	64.53831, 40.51676	930	73.54	
II	Октябрьский / Oktyabrsky	Бульвар по пр. Троицкий от ул. Карла Маркса до ул. Свободы / Boulevard along Troitsky Ave. from Karl Marx St. to Svobody St.	64.54142, 40.51554	278.9	27.28	
III	Северный / Severny (Northern)	Сквер у КЦ «Северный» / Square near the "Severny" Cultural Center	64.59312, 40.59169	119.2	40.03	
IV	Соломбальский / Solombalsky	Цветник по пр. Никольский возле стадиона «Волна» / Flower bed along Nikolsky Ave. near the "Volna" Stadium	64.57354, 40.51043	81	49.48	

V	Варавино-Фактория / Varavino-Faktoriya	Цветник у спортивной площадки / Flower bed near the sports ground	64.50158, 40.69073	52	31.50
VI	Майская горка / Mayskaya Gorka	Вазоны вдоль ул. Прокопия Галушина / Planters along Prokopy Galushin St.	64.52437, 40.60988	27	43.13

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Эколого-планировочные

В летний период 2025 год была проведена эколого-планировочная оценка ключевых объектов цветочного оформления. В рамках которой определены типы цветочного оформления [24], проведена их оценка качества и соответствия планировочно-пространственной структуре городской среды по пятибалльной шкале (от 2 до 5 баллов). В случае с оценкой качественного состояния элементов цветника 2 балла (неудовлетворительное) – это поверхность цветника спланирована грубо, растения слабо развиты, высохших и утраченных растений значительное количество, признаки развития болезней и повреждения вредителями выражены в сильной степени, много нежелательной растительности (более 25%), 5 баллов (отличное) – это поверхность цветника тщательно спланирована, растения хорошо

развиты, обильно цветут, повреждений болезнями и вредителями нет, окраска, величина цветков и листьев нормальные; растения равные по качеству, нежелательной растительности (сорняков) нет, высохших и утраченных растений нет. Для оценки соответствия планировочной структуры 2 балла (неудовлетворительное) – это цветочное оформление не соответствует окружающей стилистике, диссонирует с ней, разрушает архитектурную композицию, 5 баллов (отличное) – это рисунок элементов цветочного оформления соответствует стилистике и архитектурно-планировочному решению окружающей застройки, наблюдаются колористическое единство с окружением, соразмерность, соответствие композиционному замыслу [17]. Помимо этого, был определен видовой состав ассортимента цветочных растений и его декоративность по четырехбалльной шкале [11].



Рисунок 2. Ключевые объекты исследования:

I – Партер у Администрации ГО «Город Архангельск» (Ломоносовский), II – Бульвар по пр. Троицкий от ул. Карла Маркса до ул. Свободы (Октябрьский), III – Сквер у КЦ «Северный»(Северный), IV – Цветник по пр. Никольский возле стадиона «Волна» (Соломбальский), V – Цветник у спортивной площадки (Варавино-Фактория), VI – Вазоны вдоль ул. Прокопия Галушина (Майская горка)

Figure 2. Key research objects:

I – Ground floor at the Administration of GO "City of Arkhangelsk" (Lomonosovsky), II – Boulevard along the ave. Troitskiy from Karl Marx Street to Svobody Street (Oktyabrsky), III – the Square at the Severny Shopping Center (Severny), IV – the Flower Garden along the ave. Nikolsky near the Volna stadium (Solombalsky), V – Flower garden at the sports ground (Varavino Trading Post), VI - Flower pots along Prokopy Galushina Street (May Hill)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результаты натурного обследования подробно занесены в учетные ведомости. Высота растений и площадные характеристики цветников были измерены рулеткой или инструментом «Линейка» в Яндекс Картах. Каждому объекту дана точка географической привязки с помощью инструмента Google Maps.

Социологические

Социологические исследования проводились во второй-третьей декаде июля – начале августа 2025 г. Для обеспечения репрезентативности выборки был рассчитан ее минимальный размер (384 чел.) от генеральной совокупности, которая составляет 350661 человек проживающих в Архангельске (таблица 1).

Лесотехнический журнал 1/2026

В сети Интернет был запущен опросник «Оценка цветочного оформления города Архангельска». Опросник состоял из 2 частей: общих вопросов по теме благоустройства и отношения к цветочному оформлению общественных пространств, адаптированной анкеты оценки эстетических достоинств природных ландшафтов [25]. Адаптированная анкета включала в себя оценку ключевых объектов цветочного оформления по эколого-эстетическим и психолого-эмоциональным шкалам и вопросы о личности респондента. С помощью этой анкеты была проведена оценка 6 ключевых объектов (рисунок 2).

Опросник был оформлен в Яндекс Формах, его продвижение происходило в тематических сообществах, а также среди коллег, знакомых и друзей.

Данные, полученные комплексным методом, были обобщены и проанализированы с использованием MS Excel и IBM SPSS Statistics 27. Для графической визуализации и компоновки картографических материалов использовались средства графического дизайна.

Результаты и обсуждение

После проведения комплексной оценки эффективности ключевых объектов цветочного оформления Архангельска были получены следующие результаты.

Экономические

В 2025 году общая площадь цветочного оформления Архангельска составил 2976,31 м², это больше чем было высажено с 2020 по 2022 год (от 1915,27 до 2848 м²) и 2024 году (2898,55 м²), только в 2023 была высажена наибольшая площадь цветников (3145,67 м²) [23].

Работы по посадке цветочных растений и уходу за цветниками были выполнены в 6 территориальных округах (таблица 1). Хотя в следующих округах (Северном, Варавино-Фактории и Майской горке) не каждый сезон высаживают цветники за счет государственного бюджета [23].

По площади цветочного оформления в 2025 году доминируют два центральных района Ломоносовский (1264,7 м²) и Октябрьский (1022,4 м²). На них приходится 76,84% от площади цветников Архангельска. Это можно объяснить тем, что плотность населения в этих округах самая высокая (8919 и 2610 чел./км² соответственно).

Остальные 23,16% цветочного оформления Архангельска приходятся на округа Северный (297,8 м²), Варавино-Факторию (165,1 м²), Соломбальский (163,71 м²) и Майскую горку (62,6 м²).

На основе изученных закупочных документов была сформирована таблица 3.

Таблица 3

Ранжирование объектов по полной и удельной стоимости

Table 3

Ranking of objects by total and unit cost

№ объекта / Object No.	Полная стоимость, руб. / Total Cost, RUB	Стоимость 1 м ² , руб. / Cost per 1 m ² , RUB	Рекомендуемый ассортимент / Recommended Assortment
I	3 476 362,38	3 738,02	Петуния, цинерария, бархатцы, немезия, настурция, виола, львиный зев, лобелия, бегония (9 шт.) / Petunia, cineraria, marigolds, nemesia, nasturtium, viola, snapdragon, lobelia, begonia (9 species)
II	1 023 081,14	3 668,27	Бархатцы, петуния, бегония, виола, цинерария, флоксы, лобелия, немезия, сальвия, мимилус, рудбекия, газания (12 шт.) / Marigolds, petunia, begonia, viola, cineraria, phlox, lobelia, nemesia, salvia, mimulus, rudbeckia, gazania (12 species)
III	326 807,07	2 741,67	Бархатцы (1 шт.) / Marigolds (1 species)
IV	280 961,46	3 468,66	Бархатцы, петуния, лобелия, цинерария, виола (5 шт.) / Marigolds, petunia, lobelia, cineraria, viola (5 species)
V	188 925,54	3 633,18	Не указано / Not specified
VI	94 122,00	3 486,00	Петуния (1 шт.) / Petunia (1 species)
№ объекта	Полная стоимость, руб.	Стоимость 1 м ² , руб.	Рекомендуемый ассортимент
I	3476362,38	3738,02	Петуния, цинерария, бархатцы, немезия, настурция, виола, львиный зев, лобелия, бегония (9 шт.)
II	1023081,14	3668,27	Бархатцы, петуния, бегония, виола, цинерария, флоксы, лобелия, немезия, сальвия, мимилус, рудбекия, газания (12 шт.)
III	326807,07	2741,67	Бархатцы (1 шт.)
IV	280961,46	3468,66	Бархатцы, петуния, лобелия, цинерария, виола (5 шт.)
V	188925,54	3633,18	Не указано
VI	94122	3486	Петуния (1 шт.)

Примечание: удельная стоимость, руб./м² – это стоимость посадки растений и ухода за ними на одном квадратном метре

Note: the unit cost, rub/m², is the cost of planting and caring for plants per square meter

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

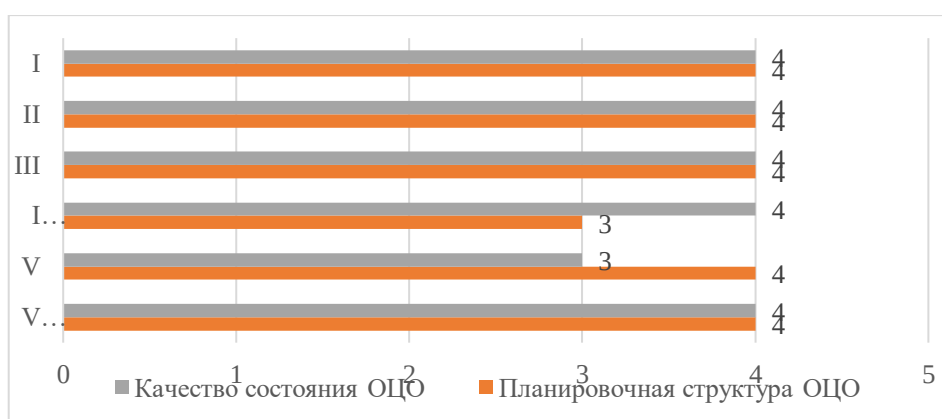


Рисунок 3. Качество состояния цветника и его планировочной структуры по территориальным округам

Figure 3. The quality of the state of the flower garden and its planning structure by territorial districts

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Самая высокая удельная стоимость в Ломоносовском округе (I объект) – 3738,02 руб/м². Затем в Октябрьском (II объект) и округе Варавино-Фактория (V объект) (3668,27 руб/м² и 3633,18 руб/м² соответственно). Средняя удельная стоимость отмечена в территориальном округе Майская горка (VI объект) и Соломбальский (IV объект) (3486 руб/м² и 3468,66 руб/м² соответственно). Самая низкая удельная стоимость была зафиксирована для Северного округа (III объект) – 2741,67 руб/м².

Самым дорогим по посадке и уходу за цветочными растениями является I объект (3476362,38 руб.), затем идет II объект (1023081,14 руб.). Среднюю стоимость имеют III, IV и V объекты (от 326807,07 до 188925,54 руб.). Низкая стоимость соответствует VI объекту (94122 руб.).

Более разнообразный ассортимент цветочных растений рекомендуют к посадке в центральных округах: в Октябрьском округе, где расположен II объект (12 шт.) и в Ломоносовском округе, где расположен I объект (9 шт.). Далее идут периферийные округа: Соломбальский (IV объект) - рекомендуют к посадке 5 видов цветочных растений. В Северном (III объект) и Майская горка (VI объект) - к посадке рекомендуется только по одному виду цветочных культур. В округе Варавино-Фактория не выдвинуто требований к ассортименту цветников.

Эколого-планировочные

Результаты эколого-планировочных методов разделены на 2 части: по оценке качества состояния и планировочной структуры цветников (рисунок 3), а также по оценке разнообразия ассортимента цветочных растений (таблица 4).

По типам цветочного оформления среди обследованных ключевых объектов преобладают:

- клумбы (II-Октябрьский, III-Северный, IV-Соломбальский, V-Варавино-Фактория),
- наземные контейнеры (II-Октябрьский, III-Северный, VI-Майская горка),
- партер встречается только в Ломоносовском округе.

В Ломоносовском округе расположен партер у здания проектных организаций и администрации города Архангельска. Это место можно считать центром города. В Майской горке самым крупным объектом цветочного оформления являются наземные контейнеры. Наземные контейнеры расположены вдоль улицы Прокопия Галушина, которая является автомобильным и пешеходным транзитом. В Октябрьском и Северном округе исследуемый объект состоит из двух типов цветочного оформления: из клумб и наземных контейнеров.

Соответствие пространственной и планировочной структуре исследуемых объектов (I, II, III, V, VI) было оценено как «хорошее» – цветник выполняет акцентную роль в пространственной структуре объекта, элементы цветочных композиций полностью соответствуют стилистике архитектурно-ландшафтного окружения, однако колористическое решение цветника не подходит к окружающей застройке и объекту инфраструктуры. Только соответствие пространственной и планировочной структуре IV объекта оценивается как «удовлетворительное» – цветник не играет роль акцента в композиции, тематика и характер рисунка цветочной композиции отличается от стилистики архитектурно-ландшафтных объектов, цветник не соответствует колористическому решению.

Качество состояния цветников исследуемых объектов (I, II, III, IV, VI) было оценено как «хорошее» - поверхность цветника спланирована с незначительными неровностями, небольшое угнетение роста, высохших и утраченных растений незначительное количество, сорняки единичны. Только качество состояния V объекта было оценено как «удовлетворительное» - поверхность цветника спланирована с значительными неровностями, у растений наблюдается значительное угнетение роста, есть признаки повреждения вредителями и болезнями, утраченных или высохших растений незначительное количество, нежелательная или сорная растительность занимает до 20% площади.

Название вида (русский) / Species name (English)	Цвет / Color	Жизненная форма / Life form	Уровень декоративности, балл / Decorative level, score	Доля от общей площади, % / Share of total area, %	№ объекта / Object No.
Петуния садовая / Garden Petunia	розово-белый, белый, красный, фиолетовый / pink- white, white, red, purple	Однолетник / Annual	3	47.57%	I, II, V, VI
Бархатец отклоненный / French Marigold	желтый, оранжевый / yellow, orange	Однолетник / Annual	4	21.68%	I, III, IV, V, VI
Цинерария приморская / Dusty Miller	серебристый / silver	Многолетник / Perennial	4	10.23%	I, II, IV, V
Мимулюс гибридный / Monkey Flower	желтый / yellow	Однолетник / Annual	3	7.12%	I, V
Бархатец прямоходящий / African Marigold	желтый / yellow	Однолетник / Annual	4	6.11%	I, II, III
Бегония клубневая / Tuberous Begonia	белый, красный / white, red	Многолетник / Perennial	3	4.86%	II
Немезия гибридная / Nemesia	синий, красный, розовый / blue, red, pink	Однолетник / Annual	3	0.95%	I, V
Лобелия ежевидная / Trailing Lobelia	синий / blue	Многолетник / Perennial	3	0.52%	I, V
Календула лекарственная / Pot Marigold	желтый / yellow	Однолетник / Annual	2	0.45%	I
Агератум Гаустона / Floss Flower	фиолетовый / purple	Многолетник / Perennial	3	0.27%	IV
Настурция большая / Nasturtium	Желтый, оранжевый / Yellow, orange	Однолетник / Annual	2	0.15%	I, VI
Гвоздика китайская / Chinese Pink	Белый, красный / White, red	Однолетник / Annual	3	0.03%	I
Пеларгония зональная / Zonal Geranium	розовый / pink	Многолетник / Perennial	3	0.03%	I
Георгин однолетний / Dahlia (grown as annual)	Желтый, розовый / Yellow, pink	Однолетник / Annual	3	0.01%	I
Астра однолетняя / China Aster	Розовый, фиолетовый / Pink, purple	Однолетник / Annual	3	0.002%	I

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

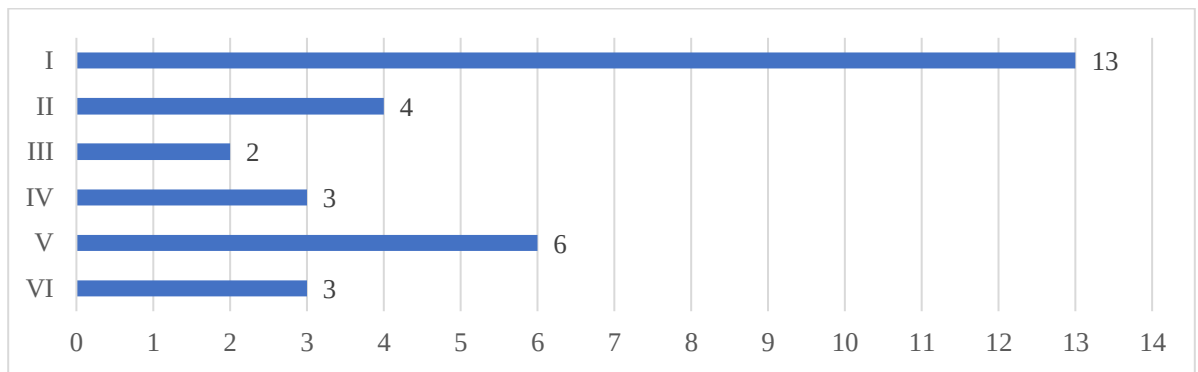


Рисунок 4. Количество видов цветочных растений (шт.) по территориальным округам
Figure 4. Number of flower plant species (pcs.) by territorial districts

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Всего на исследуемых территориях выявлено 15 видов цветочных культур. Жизненные формы их определены по агротехнике выращивания. Преобладают однолетние цветочные растения по количеству видов (10 шт.) и по занимаемой площади (84,08%). Количество многолетних цветочных растений ниже (5 шт.), и они занимают меньшую площадь (15,92%). Наибольшее видовое разнообразие цветочных культур было отмечено на I объекте (13 шт.), также богатый ассортимент определен на V объекте (6 шт.). На остальных объектах исследования (II, V, VI, III) произрастает от 2 до 4 видов цветов. Для центральных территориальных округов (Ломоносовского и Октябрьского) характерен наиболее разнообразный ассортимент цветочных культур (в среднем около 9 шт.), когда для периферийных районов (Северный, Соломбальский, Варамино-Фактория, Майская горка) ассортимент ограничен (в среднем 3 шт.) (рисунок 4).

Чаще всего встречается бархатец отклоненный (на 5 из 6 объектов), затем идут петуния садовая и цинерария приморская (на 4 из 6). Реже встречаются бархатец прямостоячий (на 3 из 6); мимулус гибридный, немезия гибридная, лобелия ежевидная, настурция большая (на 2 из 6); бегония клубневая, календула лекарственная, агератум Гаустона, гвоздика китайская, пеларгония

зональная, георгин однолетний, астра однолетняя (на 1 из 6).

Самая большая доля по площади у петунии садовой (47,57%), затем идет бархатец отклоненный (21,68%) и цинерария приморская (10,23%). Среднюю долю по площади занимает мимулус гибридный (7,12%), бархатец прямостоячий (6,11%) и бегония клубневая (4,86%). Меньшую площадь занимают следующие виды: немезия гибридная, лобелия ежевидная, календула лекарственная, агератум Гаустона, настурция большая, гвоздика китайская, пеларгония зональная, георгин однолетний, астра однолетняя (от 0,95% до 0,002% соответственно). Относительно декоративности отметим, что наилучший уровень (4 балла) у бархатца отклоненного, цинерарии приморской, бархатца прямостоячего. Средний уровень декоративности (3 балла) наблюдался у петунии садовой, мимулуса гибридного, бегонии клубневой, немезии гибридной, лобелии ежевидной и агератума Гаустона, гвоздики китайской, пеларгонии зональной, георгина однолетнего, астры однолетней. Самый низкий уровень декоративности (2 балла) был отмечен у настурции большой и календулы лекарственной.

По колористическим характеристикам чаще высаживают петунию садовую, потому что она имеет много разнообразных цветов и оттенков (розово-белый, белый, красный, фиолетовый).

Немезию гибридную (синий, красный, розовый), бархатец прямостоячий и отклоненный, настурцию большую (желтый, оранжевый), бегонию клубневую (белый, красный), гвоздику китайскую (белый, красный), георгин однолетний (желтый, розовый), астра однолетняя (розовый, фиолетовый) тоже используют разных цветов. Остальные виды цветочных растений высаживают только одного цвета.

Таким образом, доминирование однолетних культур (84%) указывает на высокую ежегодную ресурсоемкость системы цветочного оформления и снижает ее экологическую устойчивость.

Социологические

В ходе исследований анкетирование прошли 421 человек. 87,2% из количества опрошенных проживают в Архангельске, 83,8% – женщины, 61,8% – с высшим образованием и 62,9% –

работающие. Только 14,01% из числа опрошенных принимали участие в озеленении городской среды.

Первый вопрос: «Как Вы оцениваете данную цветочную композицию?» в целом охватывал цветочную композицию. Респонденты должны были ответить нравится / не нравится / затрудняюсь ответить им цветочная композиция на фотографии (рисунок 2). Больше всего опрошенным нравятся II, V, I объекты (от 68,65 до 49,17%), а не нравятся IV, III и VI объекты (от 62 % до 45,37%). Респонденты чаще упоминают центральные округа (в среднем 58,91%), чем периферийные (36,76%).

Далее был задан вопрос об элементах ландшафтной композиции «Что на фотографии привлекает внимание в первую очередь?». В этом вопросе можно было выбрать несколько вариантов ответов. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

Элементы ландшафтной композиции по шкале привлечения внимания

Table 5

Elements of a landscape composition on an attention-grabbing scale

№ Объекта / Object No.	Цвета и их сочетание, % / Colors and their combination, %	Подобранные виды цветов, % / Selected species of flowers, %	Высокая растительность, % / Tall vegetation, %	Пешеходная дорожка, % / Pedestrian pathway, %
I / I	37,18 / 37.18	24,22 / 24.22	22,54 / 22.54	16,06 / 16.06
II / II	39,11 / 39.11	28,22 / 28.22	11,76 / 11.76	20,92 / 20.92
III / III	37,93 / 37.93	25,71 / 25.71	11,44 / 11.44	24,92 / 24.92
IV / IV	42,47 / 42.47	28,84 / 28.84	13,31 / 13.31	15,37 / 15.37
V / V	43,75 / 43.75	35,68 / 35.68	10,03 / 10.03	10,55 / 10.55
VI / VI	36,53 / 36.53	28,21 / 28.21	13,82 / 13.82	21,44 / 21.44
Среднее / Average	39,50 / 39.50	28,48 / 28.48	13,82 / 13.82	18,21 / 18.21

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Большинство респондентов на всех фотографиях привлекают внимание цвета и их сочетание (39,5%), затем идут подобранные виды цветочных растений (28,48%), потом пешеходная дорожка (18,21%) и высота растительности (13,82%).

Больше всего цвета и их сочетания привлекли внимание на V и IV объекте (43,75 и 42,47% соответственно), хотя подобранные цветовые гаммы на этих объектах были оценены по-разному в V объекте (35,68%), а в IV объекте (28,84%).

Затем респонденты должны были оценить элементы ландшафтной композиции (таблица 6), эколого-эстетические свойства композиции (по шкалам разнообразности, красоты и безопасности) и эмоциональную реакцию (по шкалам радости, умиротворения, восторга). Оценка ранжировалась по шкале от 1 до 7 (где 1 крайне негативно, а 7 весьма позитивно). Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6

Общая оценка показателей опроса, балл

Table 6

Overall assessment of survey indicators, score

№ Объекта / Object No.	Ландшафтная композиция / Landscape Composition	Эколого-эстетические свойства / Ecological- Aesthetic Properties	Эмоциональная реакция / Emotional Response	Итоговая оценка / Overall Score
I	4.96	4.94	4.95	4.95
II	5.14	5.24	5.11	5.16
III	4.00	4.17	4.15	4.10
IV	3.66	3.85	3.80	3.77
V	4.64	5.08	4.89	4.87
VI	4.20	4.39	4.28	4.29

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Самую высокую общую оценку элементов ландшафтной композиции получил II объект (5,14 балла), затем I объект (4,96 балла), а потом V объект (4,64 балла). Средние оценки отмечены на V и II объектах (4,20 и 4,00 балла соответственно). Ниже всего оценка IV объекта (3,66 балла).

Максимальные оценки по эколого-эстетическим свойствам получили II, V и I объект (от 5,24 до 4,94 балла соответственно). Средние оценки отмечены на VI и III объекте (4,39 и 4,17 балла). Минимальные показатели на IV объекте (3,85 балла).

Высокие оценки по эмоциональной реакции получили II, I и V объекты (от 5,11 до 4,89 балла

соответственно), средние - на VI и III объектах (4,28 и 4,15 балла), низкие - на IV объекте (3,80 балла).

Полученные данные о социальном восприятии могут быть смещены в сторону мнения более активной и образованной части горожан, преимущественно женщин (так как в опросе приняли участие 84% женщин и 62% людей с высшим образованием).

Комплексный анализ и выявление дисбалансов

Для выявления дисбалансов эффективности цветочных композиций была рассчитана сводная таблица с экономическими, экологическими и социологическими оценками (таблица 7).

Таблица 7

Матрица дисбалансов ключевых объектов цветочного оформления

Table 7

The matrix of imbalances of key floral design objects

№ объекта / Object No.	Экон.№1, руб. / Econ #1, RUB	Экон.№2, руб/м2 / Econ #2, RUB/m ²	Эко-пл.№1, балл / Eco- Pl #1, score	Эко-пл.№2, балл / Eco- Pl #2, score	Эко- пл.№3, шт. / Eco-Pl #3, units	Соц.№1, % / Soc #1, %	Соц.№2, балл / Soc #2, score
I	3476362,38	3738,02	4	4	13	49,17	4,95
II	1023081,14	3668,27	4	4	4	68,65	5,16
III	326807,07	2741,67	4	4	2	25,42	4,10
IV	280961,46	3468,66	4	3	3	21,62	3,77
V	188925,54	3633,18	3	4	6	66,75	4,87
VI	94122	3486,00	4	4	3	33,25	4,29

Пояснения к переводу и сокращениям:

Примечание: Экон.№1 – полная стоимость, руб; Экон.№2 – стоимость 1 м², руб/м²; Эко-пл.№1 – планировочная структура, балл; Эко-пл.№2 – состояние качества, балл; Эко-пл.№3 – количество видов цветочных растений, шт; Соц.№1 – предпочтения респондентов, %; Соц.№2 – итоговая оценка, балл

Note: Eco No. 1 – total cost, RUB; EcoNo. 2 – cost of 1 m², RUB/m²; Eco-plNo.1 – planning structure, score; Eco-plNo.2 – quality status, score; Eco-plNo.3 – number of types of flowering plants, pcs; SocNo.1 – respondents' preferences, %; Soc No.2 – final score, point

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Так, прямая корреляция между стоимостью 1 квадратного метра цветника и его итоговой

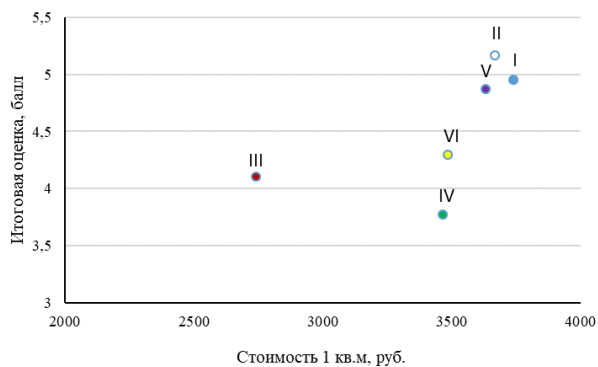


Рисунок 5. Зависимость стоимости 1 м² цветника от его итоговой оценки на объектах исследований

Figure 5. Dependence of the cost of 1 m² of a flower garden on its final assessment at research facilities

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

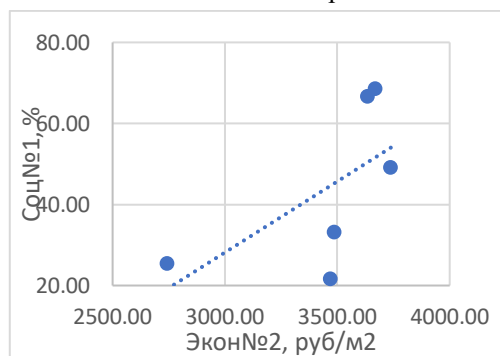


Рисунок 6. Зависимость стоимости 1 м² цветника от его предпочтения респондентами на объектах исследований

Figure 6. Dependence of the cost of 1 m² of a flower garden on its respondents' preferences at research facilities

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

оценки, полученной от респондентов в ходе социологического опроса, была выявлена нами, это подтверждает коэффициент корреляции Ро-Спирмена с силой связи 0,886 ($p = 0,019$, значения $p < 0,05$) – (рисунок 5).

Прямой корреляции между стоимостью 1 квадратного метра цветника и предпочтениями респондентов не было обнаружено, это подтверждает коэффициент Ро-Спирмена с силой связи 0,771 ($p = 0,072$, значения $p > 0,05$) – (рисунок 6).

Общий анализ исследуемых объектов

I. Партер у Администрации ГО «Город Архангельск» (Ломоносовский):

затраты – высокая полная стоимость объектов цветочного оформления (3476362,38 руб.) и стоимость за 1 м² (3738,02 руб./м²);

качество – хорошая оценка состояния качества цветника и его соответствия планировочной структуре, высокое видовое разнообразие цветочных растений (13 шт.);

восприятие – средняя итоговая оценка (4,95 балла) и уровень социального одобрения (49,17%).

Итог: нет ожидаемого социального эффекта от затрат на объекты цветочного оформления и хорошего качества цветника с разнообразием видов цветочных растений.

II. Бульвар по пр. Троицкий от ул. Карла Маркса до ул. Свободы (Октябрьский):

затраты – высокая полная стоимость ОЦО (1023081,14 руб.) и стоимость за 1 м² (3668,27 руб./м²);

качество – хорошая оценка состояния качества цветника и его соответствия планировочной структуре и средний уровень разнообразия цветочных культур (4 шт.);

восприятие – высокая итоговая оценка (5,16 балла) и уровень социального одобрения (68,25%).

Итог: пример сбалансированности, когда высокие затраты дают хорошее качество и социальное восприятие.

III. Сквер у КЦ «Северный» (Северный):

затраты – средняя полная стоимость (326807,07 руб.) и самая низкая стоимость за 1 м² (2741,67 руб./м²);

качество – хорошая оценка состояния качества цветника и его соответствия планировочной структуре и низкий уровень разнообразия цветочных культур (2 шт.);

восприятие – низкие итоговая оценка (4,10 балла) и уровень социального одобрения (25,42%).

Итог: пример сбалансированности, низкие затраты дают хорошее качество и ведут к низкому социальному одобрению.

IV. Цветник по пр. Никольский возле стадиона «Волна» (Соломбальский):

затраты – средняя полная стоимость (280961,46 руб.) и стоимость за 1 м² (3468,66 руб./м²);

качество – хорошая оценка состояния качества цветника и удовлетворительная оценка его соответствия планировочной структуре и низкий уровень разнообразия цветочных культур (3 шт.);

восприятие – самые низкие итоговая оценка (3,77 балла) и уровень социального одобрения (21,62%).

Итог: пример дисбаланса, средние затраты и частично хорошее качество ведут к низкому социальному одобрению.

V. Цветник у спортивной площадки (Варавино-Фактория):

затраты – средняя полная стоимость (188925,54 руб.) и стоимость за 1 м² (3633,18 руб./м²);

качество – удовлетворительная оценка состояния качества цветника и хорошая оценка его соответствия планировочной структуре и низкий уровень разнообразия цветочных культур (6 шт.)

восприятие – высокая итоговая оценка (4,87 балла) и уровень социального одобрения (66,75%).

Итог: пример сбалансированности, средние затраты и частично хорошее качество ведут к высокому социальному одобрению.

VI. Вазоны вдоль ул. Прокопия Галушина (Майская горка):

затраты – самая низкая полная стоимость (94122 руб.) и средняя стоимость за 1 м² (3486 руб./м²);

качество – хорошие оценка состояния качества цветника и его соответствия планировочной структуре и низкий уровень разнообразия цветочных культур (3 шт.)

восприятие – низкие итоговая оценка (4,29 балла) и уровень социального одобрения (33,25%).

Итог: пример дисбаланса средние затраты и хорошее качество ведет к низкому социальному одобрению.

Выводы

1. Проведенное исследование на основе комплексного подхода позволило оценить объекты цветочного оформления городской среды Архангельска с учетом экономических, экологических и социологических параметров. Анализ данных шести ключевых объектов в разных территориальных округах города выявил существенные различия в уровне финансирования, качестве ЦО и его социального восприятия.

2. Цветочное оформление в Архангельске характеризуется выраженной централизацией: на Ломоносовский и Октябрьский округа приходится 76,84% площади цветников. Когда для периферийных округов (Северный, Соломбальский, Варавино-Фактория, Майская горка) характерны меньшие площади (23,16%), ограниченный ассортимент растений (в среднем 4 шт.) что ведет к низким показателям социального восприятия (в среднем 36,76%).

3. Обнаружена прямая зависимость между количеством финансовых затрат и итоговой эмоционально-эстетической оценкой. Например, в Ломоносовском территориальном округе самая высокая стоимость 1 м² и одна из высоких итоговых эмоционально-эстетических оценок (4,95 балла).

4. Между высокими затратами и предпочтениями респондентов прямой зависимости не обнаружено. Это означает, что высокие затраты не всегда сопровождаются положительным восприятием горожан (Ломоносовский = 49,17%), тогда как некоторые объекты (Октябрьский

и Варавино-Фактория) со средними показателями финансирования демонстрируют высокий уровень социального восприятия (68,65 и 66,75%). Это указывает на ключевую роль колористического решения и ассортимента растений, а не только на величину вложенных средств.

5. Выявленные дисбалансы наиболее отчетливо проявляются в периферийных округах, где при схожих с центральными районами затратах (3468,66 и 3486 руб./м²) наблюдается низкий уровень социального восприятия (21,62 и 33,25%). Основными факторами, снижающими уровень социального восприятия цветочного оформления, являются однообразие ассортимента, преобладание однолетних культур, недостаточная выразительность колористических решений.

6. Разработанная матрица дисбалансов является практическим инструментом для органов управления, позволяющим выявить проблемные объекты и перераспределять бюджет в пользу решений, дающих максимальный социальный эффект.

7. Для повышения эффективности цветочного оформления городской среды Архангельска целесообразно сместить акцент с преимущественно парадного оформления центральных территорий на развитие качественного, разнообразного и адаптированного цветочного оформления в жилых районах, с обязательным учетом мнения жителей и экологических особенностей северного города.

Список литературы:

1. Beute F. et al. How do different types and characteristics of green space impact mental health? A scoping review. *People and Nature*. 2023; 5 (6): 1839–1876. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pan3.10529>.
2. Amorim J.H. et al. Regulating and cultural ecosystem services of urban green infrastructure in the nordic countries: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18 (3): 1219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031219>.
3. Aram F. et al. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*. 2019; 5 (4): e01339. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>.
4. Costantino D., Vozza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR technologies for surveying and reality modelling in urban scenarios: Evaluation methods, performance and challenges. *Applied System Innovation*. 2022; 5: 63. – DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>.
5. Жучков Д.В., Фетисов Д.М., Макаренко В.П. Функции зелёных насаждений городов в обеспечении целей устойчивого развития // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. – 2023. – № 2 (51). – С. 38-60. – DOI: <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2023-251-38-60>.
6. Федоров Р.Ю. Формирование зелёной инфраструктуры как фактора устойчивого развития городов севера Западной Сибири // *Географическая среда и живые системы*. – 2024. – № 2. – С. 104-118. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-2-104-118>.
7. Афонин А.Н., Баранова О.Г., Федорова Ю.А. Характеристика северной границы распространения *Ambrosia artemisiifolia* L. в Канаде в связи с определением экологических лимитов распространения вида на север // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2020. – № 50. – С. 28-51. – DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/50/2>.
8. Лебедев А.В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона // *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Т. 13, № 3 (51). – С. 56-70. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.
9. Беляева Т.Н. и др. Эколого-биологические особенности *Primula macrocalyx* Bunge в природе и культуре на юге Томской области // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2024. – № 68. – С. 49-77. – DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/68/3>.

10. Руссова О.Н., Смак Т.С., Тарасов И.А. Оценка комфортности городской среды как фактор социального самочувствия городских жителей Архангельской области // Арктика и Север. – 2020. – № 41. – С. 236-247. – DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.41.236>.
11. Наливайченко А.А. и др. Исследование биоразнообразия некоторых лесопарковых фитоценозов Ростовской агломерации // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4 (48). – С. 169-184. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/12>.
12. Залывская О.С., Бабич Н.А. Оценка декоративности насаждений // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 6. – С. 98-110. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-98-110>.
13. Залывская О.С. Цветоводство и цветочное оформление: учебник для вузов. – Москва: Юрайт, 2025. – 221 с. – ISBN 978-5-534-20933-4. – URL: <https://urait.ru/bcode/581676> (дата обращения: 02.03.2026).
14. Богайскова А.В. Цветочное оформление городских ландшафтов многолетними декоративными культурами // Ландшафтная архитектура и Природообустройство: от проекта до экономики – 2019: сборник трудов научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2019. – С. 28-31. – EDN: SVJTHD.
15. Pitkänen T.P., Rätty M., Hyvönen P., Korhonen K.T., Vauhkonen J. Using auxiliary data to rationalize smartphone-based pre-harvest forest mensuration. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2022; 95 (2): 247–260. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab039>.
16. Матыцина Е.П., Харченко Н.Н., Прохорова Н.Л. Анализ приживаемости древесных и кустарниковых растений на территории городского округа город Воронеж // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3 (55). – С. 284-306. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/16>.
17. Горанова О.А., Атрощенко Л.А. Оценка цветочного оформления городских общественных пространств // Вестник Университета Правительства Москвы. – 2023. – № 3. – С. 21-26. – URL: <https://journals.rcsi.science/2541-8580/article/view/273619> (дата обращения: 02.03.2026).
18. Сунгурова Н.Р., Страздаускене С.Р., Стругова Г.Н., Макаров С.С., Зубик И.Н. Систематическая структура дендрофлоры г. Мирного // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2024. – № 3 (76). – С. 118-126. – DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2024.76.3.015>.
19. Belton S., Cubry P., Fox E., Kelleher C.T. Novel Post-Glacial Haplotype Evolution in Birch – A Case for Conserving Local Adaptation. *Forests*. 2021; 12: 1246. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091246>.
20. Злобин Д.В. Социологический опрос как инструмент планирования зеленой инфраструктуры городов // Социология города. – 2024. – № 1. – С. 87-103. – DOI: https://doi.org/10.35211/19943520_2024_1_87.
21. Славский В.А., Литовченко Д.А., Мироненко А.В., Харченко Н.Н., Говедар З. Изучение взаимосвязи между параметрами рельефа местности и условиями произрастания насаждений в Воронежской области // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 146-161. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/10>.
22. Иванова Л.А., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н. Северное цветоводство. – 2-е изд., перераб. и доп. – Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра, 2023. – 358 с. – DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.422.8>.
23. Валекжанин А.А., Сунгурова Н.Р. Оценка цветочного оформления общественных пространств г. Архангельска на основе анализа конкурсных закупок по посадке и уходу за цветниками // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. – 2025. – № 3 (80). – С. 63-72. – DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2025.80.3.007>.
24. Константинов А.В. и др. Динамика количественного распределения видов адаптационных мероприятий и затрат на их проведение в лесах России в условиях изменений климата // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15, № 4 (60). – С. 456-472. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27>.
25. Боев В.А., Иеронова В.В., Петухов А.С. Экологическое состояние почвенного и растительного покрова лесопарка им. Ю.А. Гагарина г. Тюмени // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15, № 1 (57). – С. 188-205. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/12>.

References

1. Beute F., Andreucci M.B., Lammel A., Davies Z., Glanville J., Hoyle H., Barbosa O., Mavoa S., O'Sullivan A., Keune H. How do different types and characteristics of green space impact mental health? A scoping review. *People and Nature*, 2023; 5 (6): 1839–1876. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pan3.10529>.
2. Amorim J.H., Engström J., Wang J., Ribeiro C., Selmokiene A., Grizetti B., Reichel S., Revi A., Ferreira F. Regulating and cultural ecosystem services of urban green infrastructure in the nordic countries: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021; 18 (3): 1219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031219>.
3. Aram F., Solgi E., García E.H., Mosavi A. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 2019; 5 (4): e01339. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>.
4. Costantino D., Vozza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR technologies for surveying and reality modelling in urban scenarios: Evaluation methods, performance and challenges. *Applied System Innovation*, 2022; 5: 63. – DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>.
5. Zhuchkov D. V., Fetisov D. M., Makarenko V. P. Funktsii zelyonykh nasazhdeniy gorodov v obespechenii tseley ustoychivogo razvitiya. [Functions of urban green spaces in ensuring sustainable development goals]. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleyhema*, 2023; (2) 51: 38–60. – DOI: <https://doi.org/10.24412/2227-1384-2023-251-38-60>.
6. Fedorov R. Yu. Formirovaniye zelenoy infrastruktury kak faktora ustoychivogo razvitiya gorodov severa Zapadnoy Sibiri. [Formation of green infrastructure as a factor of sustainable development of the cities of the north of Western Siberia]. *Geograficheskaya sreda i zhyvye sistemy*, 2024; (2): 104–118. – DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-2-104-118>.
7. Afonin A.N., Baranova O.G., Fedorova Yu.A. Kharakteristika severnoy granitsy rasprostraneniya *Ambrosia artemisiifolia* L. v Kanade v svyazi s opredeleniyem ekologicheskikh limitov rasprostraneniya vida na sever. [Characteristics of the northern distribution boundary of *Ambrosia artemisiifolia* L. in Canada in connection with determining the ecological limits of the species distribution to the north]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2020; 50: 28–51. – DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/50/2>.
8. Lebedev A. V. Inventarizatsiya drevesnykh nasazhdeniy urbanizirovannykh territoriy s ispol'zovaniyem smartfona. [Inventory of tree plantations in urban areas using a smartphone]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2023; 13 (3) 51: 56–70. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.
9. Belyaeva T.N., Prokop'yev A.S., Butenkova A.N., Kataeva T.N., Khazina I.V., Kuz'mina O.B., Melkova O.V. Ekologo-biologicheskiye osobennosti *Primula macrocalyx* Bunge v prirode i kulture na yuge Tomskoy oblasti. [Ecological and biological features of *Primula macrocalyx* Bunge in nature and culture in the south of Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2024; 68: 49–77. – DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/68/3>.
10. Russova O.N., Smak T.S., Tarasov I.A. Otsenka komfortnosti gorodskoy sredy kak faktor sotsial'nogo samochuvstviya gorodskikh zhyteley Arkhangel'skoy oblasti. [Assessment of the comfort of the urban environment as a factor of social well-being of the urban residents of the Arkhangelsk region]. *Arktika i Sever*, 2020; 41: 236–247. – DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.41.236>.
11. Nalivaychenko A.A., Skripnikov P.N., Gorbov S.N., Matetskaya A.Yu. Issledovaniye bioraznoobraziya nekotorykh lesoparkovykh fitotsenozov Rostovskoy aglomeratsii. [Study of the biodiversity of some forest park phytocenoses of the Rostov agglomeration]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2022; 12 (4) 48: 169–184. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/12>.
12. Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Otsenka dekorativnosti nasazhdeniy. [Assessment of the decorative value of plantings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2020; (6): 98–110. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-98-110>.

13. Zalyvskaya O.S. Tsvetovodstvo i tsvetochnoye оформлениe: uchebnyk dlya vuzov. [Floriculture and flower decoration: a textbook for universities]. Moscow: Yurayt, 2025. – 221 p. – ISBN 978-5-534-20933-4. – URL: <https://urait.ru/bcode/581676> (data obrashcheniya: 05.12.2025).
14. Bogayskova A. V. Tsvetochnoye оформлениe gorodskikh landshaftov mnogoletnimi dekorativnymi kul'turami. [Floral decoration of urban landscapes with perennial ornamental crops]. Landshaftnaya arkhitektura i Prirodobustroystvo: ot proyekta do ekonomiki – 2019. Voronezh: Voronezhskiy GAU, 2019. Pp. 28–31. – EDN: SVJTHD.
15. Pitkänen T.P., Rätty M., Hyvönen P., Korhonen K.T., Vauhkonen J. Using auxiliary data to rationalize smartphone-based pre-harvest forest mensuration. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2022; 95 (2): 247–260. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab039>.
16. Matytsina E.P., Kharchenko N.N., Prokhorova N.L. Analiz prizhivayemosti drevesnykh i kustarnikovykh rasteniy na territorii gorodskogo okruga gorod Voronezh. [Analysis of the survival of trees and shrubs on the territory of the city of Voronezh]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2024; 14 (3) 55: 284–306. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/16>.
17. Goranova O.A., Atroshchenko L.A. Otsenka tsvetochnogo оформлениa gorodskikh obshchestvennykh prostranstv. [Evaluation of floral decoration of urban public spaces]. *Vestnik Universiteta Pravitel'stva Moskvy*, 2023; (3): 21–26. – URL: <https://journals.rcsi.science/2541-8580/article/view/273619>.
18. Sungurova N.R., Strazdauskene S.R., Strugova G.N., Makarov S.S., Zubik I.N. Sistematicheskaya struktura dendroflory g. Mirnogo. [Systematic structure of the dendroflora of the city of Mirny]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova*, 2024; 3 (76): 118–126. – DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2024.76.3.015>.
19. Belton S., Cubry P., Fox E., Kelleher C.T. Novel Post-Glacial Haplotype Evolution in Birch – A Case for Conserving Local Adaptation. *Forests*, 2021; 12: 1246. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091246>.
20. Zlobin D. V. Sotsiologicheskii opros kak instrument planirovaniya zelenoy infrastruktury gorodov. [Sociological survey as a tool for planning urban green infrastructure]. *Sotsiologiya goroda*, 2024; (1): 87–103. – DOI: https://doi.org/10.35211/19943520_2024_1_87.
21. Slavskiy V.A., Litovchenko D.A., Mironenko A.V., Kharchenko N.N., Titov E.V., Govedar Z. Izucheniye vzaimosvyazi mezhdu parametrami rel'yefa mestnosti i usloviyami proizrastaniya nasazhdeniy v Voronezhskoy oblasti. [Study of the relationship between terrain parameters and growing conditions of plantations in the Voronezh region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2023; 13 (1): 146–161. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/10>.
22. Ivanova L.A., Svyatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N. Severnoye tsvetovodstvo. [Northern floriculture]. 2nd ed., revised and enlarged. Apatity: Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra, 2023. – 358 p. – DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.422.8>.
23. Valekzhanin A.A., Sungurova N.R. Otsenka tsvetochnogo оформлениa obshchestvennykh prostranstv g. Arkhangel'ska na osnove analiza konkursnykh zakupok po posadke i ukhodu za tsvetnikami. [Assessment of floral decoration of public spaces in Arkhangelsk based on the analysis of competitive procurement for planting and caring for flower beds]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii imeni V.R. Filippova*, 2025; 3 (80): 63–72. – DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2025.80.3.007>.
24. Konstantinov A.V., Burtsev D.S., Gavriluk E.S., Koroleva T.S., Torshukova Z.A. Dinamika kolichestvennogo raspredeleniya vidov adaptatsionnykh meropriyatiy i zatrat na ikh provedeniye v lesakh Rossii v usloviyakh izmeneniy klimata. [Dynamics of the quantitative distribution of types of adaptation measures and costs for their implementation in the forests of Russia under climate change]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2025; 15 (4) 60: 456–472. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/27>.
25. Boev V.A., Ieronova V.V., Petukhov A.S. Ekologicheskoye sostoyaniye pochvennogo i rastitel'nogo pokrova lesoparka im. Yu.A. Gagarina g. Tyumeni. [Ecological condition of soil and vegetation cover of the Yu.A. Gagarin forest park in Tyumen]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2025; 15 (1) 57: 188–205. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/12>.

Сведения об авторах

Валекжанин Андрей Алексеевич – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2302-6129>, e-mail: valekzhanin13@gmail.com.

Сунгурова Наталья Рудольфовна – доктор с.-х. наук, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>, e-mail: n.sungurova@narfu.ru.

Бабич Николай Алексеевич – доктор с.-х. наук, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>, e-mail: n.babich@narfu.ru.

Залывская Ольга Сергеевна – доктор с.-х. наук, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>, e-mail: o.zalyvskaya@narfu.ru.

Лазарева Ирина Васильевна – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17, 163002, Российская Федерация, e-mail: lazar0903@mail.ru.

Information about the authors

Andrey A. Valekzhanin – is a postgraduate student at the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2302-6129>, e-mail: valekzhanin13@gmail.com.

Natalia R. Sungurova – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>, e-mail: n.sungurova@narfu.ru.

Nikolay A. Babich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>, e-mail: n.babich@narfu.ru.

Olga S. Zalyvskaya – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7520-6295>, e-mail: o.zalyvskaya@narfu.ru.

Irina V. Lazareva – Postgraduate Student of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: lazar0903@mail.ru.

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/17>

УДК 630*27:582.572.2:631.527(470.3)



Интродукция сортов бородатых ирисов, перспективных для использования в озеленении

Наталья А. Мамаева, mamaeva_n@list.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1191-5965>

Юлия А. Хохлачева , ldr_gbsran@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1883-8704>

ФГБУН «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН», ул. Ботаническая, 4, г. Москва, 127276, Российская Федерация

В статье представлены результаты интродукционной оценки 91 сорта бородатых ирисов с целью разработки рекомендаций по их дальнейшему использованию в озеленении на объектах различного пользования, располагающихся в рамках IV зоны зимостойкости по USDA. Исследования проводились на базе лаборатории декоративных растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН в период 2011–2023 гг. Интродукционные испытания проводились на основе принятых подходов и методик. Отбор перспективных для озеленения сортов осуществлен по 9 критериям. Наиболее перспективными как для частного, так и для массового городского озеленения оказались низкорослые сорта группы SDB, среднерослые сорта группы IB, большинство исторических сортов и некоторые отечественные сорта (вне зависимости от их принадлежности к той или иной садовой группе). Малоперспективными для IV зоны зимостойкости оказались сорта из групп Aril (AR) и Arilbread (AB), сорта «космического направления» с модифицированной морфологией бородки, а также сорта с ремонтантным типом цветения. Выполненная работа представляет интерес с практической точки зрения, так как ее результаты могут быть использованы для расширения ассортимента сортов ирисов, перспективных для использования в озеленении, как городском, так и частном.

Ключевые слова: *Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, лаборатория декоративных растений, интродукция, коллекционный фонд, Iris Tourn. ex L.*

Финансирование: Исследования проводились в рамках реализации государственного задания ГБС РАН «Биологическое разнообразие природной и культурной флоры: фундаментальные и прикладные вопросы изучения и сохранения, № госрегистрации 122042700002-6.

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мамаева, Н. А. Интродукция сортов бородатых ирисов, перспективных для использования в озеленении / Н. А. Мамаева, Ю. А. Хохлачева // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 269–282. – Библиогр.: с. 279–282 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/17>.

Поступила 25.12.2025. Пересмотрена 20.01.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Introduction of cultivars of bearded irises promising for use in urban landscaping

Natalia A. Mamaeva, mamaeva_n@list.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1191-5965>

Julia A. Khokhlacheva , ldr_gbsran@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1883-8704>

Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences, 4 Botanicheskaya Street, Moscow, 127276, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of an introduction assessment of 91 cultivars of bearded irises in order to develop recommendations for their further use in landscaping at various facilities located within the IV winter hardiness zone according to the USDA. The research was conducted on the basis of the Laboratory of ornamental plants of the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences in the period 2011-2023. The introduction tests were conducted on the basis of accepted approaches and techniques. The selection of promising cultivars for landscaping was carried out according to 9 criteria. The low-growing cultivars of the SDB group, medium-sized cultivars of the IB group, most historical cultivars and some domestic cultivars (regardless of their belonging to one or another garden group) turned out to be the most promising for both private and mass urban gardening. Cultivars from the Aril (AR) and Arilbread (AB) groups, cultivars of the "cosmic direction" with modified beard morphology, as well as cultivars with a repair type of flowering turned out to be unpromising for the IV winter hardiness zone. The work performed is of interest from a practical point of view, as its results can be used to expand the range of iris cultivars that are promising for use in landscaping, both urban and private.

Keywords: *Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences, laboratory of ornamental plants, introduction, collection fund, Iris Tourn. ex L.*

Funding: The work was carried out in accordance to Institutional research project n. 122042700002-6.

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

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

For citation: Mamaeva N. A., Khokhlacheva J. A. (2026). Introduction of cultivars of bearded irises promising for use in urban landscaping. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 269–282 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/17>.

Received 25.12.2025. **Revised** 20.01.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

В связи с неблагоприятной экологической обстановкой в современных мегаполисах и крупных городах зеленые насаждения, созданные с использованием научно обоснованных подходов, стали неотъемлемым элементом городской инфраструктуры, обеспечивающим нормальную жизнедеятельность горожан [1-9]. Поэтому интродукционные исследования и дальнейшая селекционная работа с использованием генотипов с высоким адаптационным и фиторесурсным

потенциалом является одним из наиболее актуальных направлений деятельности ботанических садов [10]. В настоящее время создание новых сортов декоративных растений, перспективных для использования в городском озеленении реализуется на базе генетических ресурсов полевых банков в разных ботанических садах России.

В России бородатые ирисы (род *Iris* Tourn. ex L., подрод *Iris*) являются одним из наиболее распространенных многолетников, активно используемых в озеленении [11]. При этом у них происходит не только постоянное расширение

ассортимента, но и активная сортосмена, когда один сорт заменяет другой. Поэтому объективной необходимостью является систематический мониторинг и коррекция перечня сортов бородастых ирисов, перспективных для использования в составе городских ландшафтных композиций. При этом целесообразным является его расширение за счет применения малораспространенных или недавно созданных сортов. Это позволяет эффективно использовать генетические ресурсы этой культуры за счет введения в состав урбанوفитоценозов зимостойких, стабильно хорошо размножающихся вегетативно, относительно толерантных к неблагоприятным факторам городской среды, низко восприимчивых к основным инфекционным заболеваниям сортов с достаточно высоким уровнем декоративных характеристик [12].

Цель работы – интродукционное испытание сортов бородастых ирисов, не входивших в состав коллекционного фонда лаборатории декоративных растений Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН (ГБС РАН) для их дальнейшего использования в озеленении.

Материалы и методы

Объект исследований – 91 сорт бородастых ирисов, изученных в интродукционном эксперименте в ГБС РАН. В представленной статье отражены результаты научной работы за период 2011–2023 гг.

Интродукционные испытания проведены на основе принятых подходов и методик [13–16].

В ходе полевых экспериментов сорта оценивали по комплексу хозяйственно-ценных и декоративных характеристик. В первую категорию вошли: зимостойкость, морозоустойчивость, засухоустойчивость, устойчивость к избыточному увлажнению почвы в период вегетации растений и в целом в безморозный период года, интенсивность повреждения возбудителями основных инфекционных летальных заболеваний бородастых ирисов (*Erwinia carotovora* (Jones) Holland, *Erwinia aroideae*, *Pseudomonas iridis* Holland) – возбудители бактериоза или мягкой гнили корневищ и *Fusarium oxysporum* Schltdl., *Fusarium macroceras* Wr. Et Rg., *Fusarium solani* (Mart.) App. et Wr. var. *argillaceum* (Fr.) – возбудители фузариоза или сухой гнили корневищ), коэффициент вегетативного размножения, плотность и интенсивность разрастания куртины, способность к формированию семян. Во второй учитывали: высоту растения, интенсивность цветения (коэффициент орнаментальности), регулярность цветения (в случае наличия периодичности – его частота), наличие периода массового цветения и его длительность, число цветков на цветоносе, число одновременно раскрытых цветков на цветоносе,

размеры и форма цветка, наличие/отсутствие гофрированности, кружева по краю и бархатистости на долях околоцветника, способность к сохранению формы и окраски цветков под влиянием неблагоприятных экзогенных факторов (интенсивные осадки, резкие изменения температуры воздуха, чрезмерная солнечная инсоляция), размеры и форма бородачки, регулярность реализации в фенотипе сортоспецифических морфологических признаков бородачки, принадлежность к какой-либо цветовой группе по основной окраске цветка, наличие и тип рисунка (пятно, кайма, мазки, штрихи) на долях околоцветника. Также осуществляли фенологические наблюдения.

Принятые авторами представленного исследования основные критерии отбора сортов в целом мало зависели от их принадлежности к той или иной садовой группе, но определяли высокую устойчивость сортов в культуре (жизнестойкость). В этот составной признак вошли следующие характеристики: высокая зимостойкость (способность зимовать без укрытия) в условиях IV зоны; высокий коэффициент вегетативного размножения (низкорослые – более 35 деленок, среднерослые и исторические высокорослые – более 25 деленок); высокая продуктивность цветения (коэффициент орнаментальности больше 0,5) и большая продолжительность цветения (низкорослые – не менее 20 суток, среднерослые – не менее 15 суток, высокорослые – не менее 10 суток), устойчивость к болезням выше среднего уровня (иммунный ответ растений существенно замедляет развитие патогенов в условиях среднего инфекционного фона в сравнении с восприимчивыми сортами-эталоном), высокая устойчивость к неблагоприятным погодным условиям в течение вегетации растений (сохранность более 85% частей куртин в среднем по сорту).

Отбор многолетников для городских цветников выполнен на основе комплексного учета 9 критериев:

- 1) экологические требования растений должны соответствовать климатическим особенностям предполагаемого региона выращивания;
- 2) предпочтительно использовать настоящие многолетники (беспересадочный период 5–10 и более лет);
- 3) рекомендуются многолетники, устойчивые к возбудителям заболеваний и вредителям;
- 4) основу ассортимента должны составлять стабильно декоративные виды и сорта;

5) предпочтительно использовать трудно выкапываемые, быстро разрастающиеся растения;

6) не рекомендуется использовать эксклюзивных видов и сортов;

7) не рекомендуются опасные для здоровья растения;

8) количество почвопокровных, плохо противостоящих сорнякам растений должно быть ограничено;

9) не целесообразно в городских цветниках общего пользования использовать растения, нуждающиеся в ежегодном выкапывании [17].

При озеленении частных территорий неактуальным является учет критериев №№ 6, 8 и 9.

Примененные авторами сортов, рекомендованных к использованию характеристики «оптимально» и «допустимо» являются компиляцией частично субъективной оценки их декоративных характеристик и совокупности объективных экспериментальных данных, полученных в ходе выполненного исследования, по таким признакам как коэффициент вегетативного размножения, устойчивость к основным инфекционным летальным заболеваниям, коэффициент орнаментальности, продолжительность цветения, наличие периода массового цветения и его длительность, способность к сохранению декоративного эффекта под влиянием неблагоприятных экзогенных факторов. Соответственно, градация «оптимально» подразумевает максимальную степень положительного проявления этих характеристик (в рамках изученной выборки бородатых ирисов), а градация «допустимо» – высокую, но не наибольшую.

Выбор растений осуществлен для разных типов ландшафтных композиций, расположенных в границах IV зоны зимостойкости по классификации USDA.

Отобранные в ходе эксперимента сорта предложены для использования в составе 6 типов ландшафтных композиций: рокарий, группа, миксбордер, моносортовая посадка, рабатка, сад в стиле Natur Garden [18].

Рокарий – искусственно созданная геопластическая форма из камней и растений без привязки к конкретным растительным сообществам.

Моносортовая посадка (простая группа) – прием, при котором в группы высаживается только один сорт растения.

Группа (сложная) – посадка, состоящая, как правило, из 3–5 наименований растений. Они различаются по высоте, габитусу, срокам цветения.

Миксбордер – смешанный бордюр из многолетников и кустарников. Характеризуется многократной сменой цветения используемых растений в течение вегетационного периода. Смена осуществляется путем подбора многолетников и кустарников.

Рабатка – цветник прямоугольной формы шириной 50–150 см. Длина рабатки произвольная, но при этом должна быть не менее трех величин ширины. Рабатку размещают вдоль дорожек с одной или нескольких сторон, а также вдоль зданий или других сооружений.

Сад в стиле Nature Garden – это создание пространства, максимально приближенного к природным сообществам.

Результаты и их обсуждение

Коллекция представителей рода *Iris* в лаборатории декоративных растений ГБС РАН – одна из самых старых. Исторически в структуре научной работы лаборатории немаловажное значение имеет класс бородатых ирисов. В составе коллекции традиционно доминировали высокорослые сорта *I. × hybrida hort.* В течение XXI в. происходит увеличение разнообразия сортов бородатых ирисов. В результате в современной коллекции представлены сорта *I. × hybrida* из всех садовых групп. За период существования коллекции (около 70 лет) сложился комплекс направлений интродукционных исследований. Его основой являлись испытания зарубежных сортов. В настоящее время научная работа модифицирована. Она стала ориентирована на расширение разнообразия представителей класса бородатые ирисы.

Согласно планам научной работы лаборатории декоративных растений, использование коллекционного фонда представителей рода *Iris* предусмотрено по 4 основным направлениям:

- 1) интродукционные исследования;
- 2) расширение ассортимента растений, рекомендуемых для использования в озеленении урбанизированных территорий;
- 3) селекционная работа;
- 4) образовательная и просветительская деятельность [19].

В период 2011–2023 гг. коллекция активно использована в интродукционных исследованиях. Акцент делается на отбор сортов, перспективных для массового использования в озеленении.

В рамках научной работы по интродукции бородатых ирисов реализуются 7 направлений.

I Интродукционное испытание новых для коллекции ирисов лаборатории декоративных растений среднерослых (группы IB и BB) и низкорослых (группа SDB) сортов Iris × hybrida

Интродукционное испытание сортов бородатых ирисов в лаборатории декоративных растений исторически является основной научной работой с коллекцией ирисов. До 2010 г. при отборе предпочтение традиционно отдается высокорослым сортам (group TB – tall bearded). Среди бородатых ирисов – это наиболее многочисленная группа.

За последние 15 лет исследования ориентированы на сорта из групп IB и SDB. Для IV зоны зимостойкости они оказались наиболее устойчивыми. Были изучены 55 низкорослых и 25 среднерослых сортов. По итогам интродукционной работы в период 2011–2023 гг. коллекционный фонд пополнился 53 сортами *I. × hybrida*, что составляет 66% от общего числа культиваров, испытанных в этот период: 44% – доля низкорослых и 23% – среднерослых сортов. При этом основополагающими факторами, лимитирующими успешность интродукционных испытаний представителей группы SDB, являлись: отсутствие быстрого схода талой воды в ранневесенний период, избыточное количество осадков в период вегетации; для группы IB – переизбыток почвенной влаги в совокупности с недостатком суммы активных температур в период вегетации; для обеих групп сортов – наличие осенью периодов с избыточными температурами воздуха и количеством осадков, восприимчивость растений к основным инфекционным заболеваниям (для низкорослых сортов – это, преимущественно, возбудители бактериоза, в меньшей степени – фузариоза; для среднерослых сортов – наоборот).

Большинство сортов рекомендованы для использования в озеленении как общедоступных городских, так и частных территорий (Khoroshkov and Derevianko, 2021).

Представители группы SDB

1) частные территории [20]:

• *рабатка*: ‘Esoteric’ (допустимо), ‘Fascinated Wanderer’, ‘Guidewort’ (оптимально), ‘It’s So Fine’, ‘Orange Design’, ‘Sheldon Butt’, ‘Silkand Velvet’;

• *группа*: ‘Add It App’ (оптимально), ‘Alene’s New Love’, ‘Ice and Indigo’, ‘Jungle Gem’, ‘No Contest’, ‘Quote’ (допустимо), ‘Storm Song’, ‘Wish Upon a Star’;

• *миксбордер*: ‘Big Blue Eyes’, ‘Music’ (оптимально), ‘Pilgrims’ Choice’, ‘Priwall’, ‘Serendipity Elf’, ‘Sigh’, ‘Welder’s Flame’;

• *моносортная посадка*: подходят все выше упомянутые сорта.

2) городские объекты ограниченного пользования:

• *рабатка*: ‘Moonlighting’, ‘Pilgrims’ Choice’, ‘Storm Song’ (оптимально).

Представители групп IB

1) частные территории:

• *моносортная посадка*: ‘Bold Stroke’, ‘Fire Down Below’, ‘Fooled Me’, ‘Goddess of Green’, ‘Hackmatack’, ‘In a Flash’, (оптимально), ‘Jangles’, ‘Magic Bubbles’, ‘Persian Wood’, ‘Protocol’, ‘Prowl’, ‘Rumours’;

• *рабатка*: ‘For Your Love’, ‘In a Flash’, ‘Jangles’, ‘O’Cool’, ‘Protocol’, ‘Tact’;

• *группа*: ‘Captain Indigo’, ‘Cool Maid’, ‘For Your Love’, ‘Hackmatack’, ‘In a Flash’ (оптимально), ‘Jangles’, ‘Protocol’ (допустимо), ‘Tact’, ‘O’Cool’;

• *миксбордер*: ‘Fooled Me’, ‘In a Flash’ (оптимально), ‘Lemon Wine’, ‘Orangeux’, ‘Tact’.

2) городские объекты ограниченного пользования:

• *рабатка*: ‘Fooled Me’ (оптимально), ‘Lemon Wine’, ‘Tact’ (допустимо);

• *группа*: ‘Bold Stroke’, ‘Fooled Me’ (оптимально), ‘Lemon Wine’, ‘Tact’ (допустимо);

• *миксбордер*: ‘Fooled Me’ (оптимально), ‘In a Flash’, ‘Lemon Wine’;

моносортная посадка: ‘For Your Love’, ‘Hackmatack’, ‘In a Flash’ (оптимально), ‘Protocol’ (рис. 1).



‘Fooled Me’



‘Tact’



‘Orange Design’



‘Music’

Рисунок 1. Некоторые сорта группы SDB и IB, перспективные для городского озеленения

Figure 1. Some cultivars of the SDB and IB groups that are promising for urban landscaping

Источник: фотография Мамаевой Н.А.

Source: photo by N.A. Mamaeva

II Расширение в составе коллекции разнообразия сортов из малочисленных или малораспространенных групп садовых бородатых ирисов: Миниатюрные карликовые Бородатые ирисы (MDB) и Миниатюрные высокие Бородатые ирисы (MTB)

Сорта из данных групп на территории РФ малочисленные и малораспространенные. Это направление хотя и включено в научную работу, но реализуется не регулярно. По итогам инвентаризации 2013 г. в состав коллекции входили 5 сортов группы MDB (‘Alpine Lake’, ‘Egret Snow’, ‘Gold Canary’, ‘Golden Eyelet’, ‘Robin’s Egg’) и 4 сорта группы MTB (‘Bangles’, ‘Bumblebee Delight’, ‘Frosted Velvet’, ‘Virginia Lyle’). К 2023 г. состав сортов изменился незначительно. Группа MDB пополнилась 1 сортом – ‘Tiny Titan’. Группа MTB увеличилась на 2 сорта – ‘Age’ и ‘Dolce’, что составляет 25 и 40% соответственно от числа сортов, изученных в рамках интродукционного эксперимента за период 2013–2023 гг. Основными факторами, определившими браковку сортов в ходе интродукционных испытаний являлись недостаток

суммы активных температур в период вегетации растений и избыточное количество осадков в безморозный период календарного года (для сортов группы MDB), наличие длительной весенней засухи и переизбыток почвенной влаги в период вторичного вегетативного роста растений (для сортов группы MTB), восприимчивость растений к основным инфекционным заболеваниям, низкие темпы разрастания куртин, детерминированные слабой пластичностью сортов (для представителей обеих садовых групп).

Сорта рекомендованы для использования в следующих вариантах ландшафтных композиций:

1) городские объекты ограниченного пользования и частные территории:

- *моносортная посадка*: подходят все выше упомянутые сорта группы MTB, кроме ‘Age’ и ‘Dolce’;
- *группа*: ‘Age’ и ‘Dolce’ (допустимо), ‘Virginia Lyle’ (оптимально);
- *миксбордер*: ‘Bangles’, ‘Virginia Lyle’ (оптимально).

2) частные территории:

• *сад в стиле Nature Garden*: ‘Gold Canary’, ‘Golden Eyelet’ (оптимально), ‘Egret Snow’, ‘Robin’s Egg’ (допустимо);



‘Virginia Lyle’

рокарий: подходят все выше упомянутые сорта группы MDB (рис. 2).



‘Gold Canary’

Рисунок 2. Некоторые сорта бородатых ирисов, перспективные для применения в составе цветников на территориях различного назначения

Figure 2. Some cultivars of Bearded irises that are promising for use in flower beds in territories for various purposes

Источник: фотография Мамаевой Н.А.

Source: photo by N.A. Mamaeva

III Создание собрания исторических сортов

За период 2011–2023 гг. В состав коллекционного фонда входили 12 наименований: ‘Jacquesiana’ (Lemon, 1840), ‘Mme. Chereau’ (Lemon, 1844), ‘Innocence’ (Lemon, 1854), ‘Gracchus’ (Ware, 1884), ‘Amas’ (collected Foster, 1885), ‘Pallida Perfecta’ (Bar, 1892), ‘Isoline’ (Vilmorin-Andrieux et Cie, 1904), ‘Caterina’ (Foster, 1909), ‘Quaker Lady’ (Fass, 1909), ‘La Beaute’ (G.&A. Clark, 1913), ‘Mme. Chobaut’ (Denis, 1916), ‘Mlle. Schwartz’ (Denis, 1916). Перспективность их интродукции и сохранения в составе коллекционного фонда определяются, в основном, высоким адаптационным потенциалом исторических сортов. Он, в свою очередь, обусловлен комплексом хозяйственно-ценных признаков: высокой зимостойкостью, очень высоким уровнем пластичности (позволяющий растениям адаптироваться к различным погодным условиям), высокой интенсивностью разрастания куртин, толерантностью к возбудителям бактериоза и фузариоза, отсутствием ежегодно реализующейся высокой интенсивности цветения (оказывающей отрицательное влияние на вегетативное возобновление растений). Кроме того, относительно низкие декоративные характеристики исторических сортов определяют их достаточно высокую вандалоустойчивость.

Сорта рекомендованы для использования в следующих вариантах:

1) городские объекты ограниченного пользования и частные территории:

• *сад в стиле Nature Garden*: ‘Amas’ (оптимально), ‘Caterina’, ‘Gracchus’, ‘Innocence’, ‘Jacquesiana’, ‘Pallida Perfecta’.

Все указанные сорта могут быть использованы при реставрации исторических объектов ландшафтной архитектуры.

2) городские объекты ограниченного пользования:

• *моносортная посадка*: ‘Gracchus’ (оптимально), ‘Innocence’ (допустимо), ‘Jacquesiana’, ‘Mme. Chereau’;

• *рабатка*: ‘Caterina’, ‘Pallida Perfecta’.

3) городские объекты общего пользования:

• *группа*: ‘Gracchus’, ‘Jacquesiana’.

4) частные территории:

• *группа*: ‘La Beaute’, ‘Quaker Lady’

миксбордер: ‘Isoline’, ‘Mlle. Schwartz’, ‘Mme. Chobaut’ (рис. 3).



‘Mme. Chereau’



‘Gracchus’

Рисунок 3. Некоторые сорта, рекомендованные для озеленения города

Figure 3. Some cultivars recommended for urban landscaping

Источник: фотография Мамаевой Н.А.

Source: photo by N.A. Mamaeva

IV Интродукция сортов отечественной селекции (СССР и РФ)

Это направление для лаборатории декоративных растений не новое, но до 2011 г. существенного развития не имело. С 2011 г. научная работа была направлена, в том числе, и на мобилизацию исходного материала сортов отечественной селекции для дальнейших интродукционных испытаний. Больше всего сортов (33 шт.: 18 – созданных в СССР; 15 – в РФ) были собраны за период 2012–2016 гг. В период 2017–2023 гг. на интродукционном испытании находились еще 6 сортов селекции РФ. В итоге к 2023 г. в состав коллекции вошли 12 культиваров (31% от общего количества сортов, испытанных в рамках интродукционного эксперимента за период 2011–2023 гг.): ‘Айвенго’, ‘Гвардейский’, ‘Голубой Залив’, ‘Заросший Пруд’, ‘Лист Мебиуса’, ‘Русская Зима’, ‘Сердоликовая Бухта’, ‘Синяя Борода’, ‘Союз Сердец’, ‘Три Грации’, ‘Хуторок в Степи’, ‘Шаги Командора’. Спектр факторов, лимитировавших успешность интродукционного испытания, оказался очень широким и, вероятно, не зависел от происхождения сортов (факта их создания в СССР и РФ), но определялся, преимущественно, их принадлежностью к той или иной садовой группе.

На наш взгляд, перспективность интродукционной работы с этой категорией

бородатых ирисов обусловлена, прежде всего, потенциально наиболее высокими адаптационными свойствами сортов к почвенно-климатическим условиям выращивания в регионах их создания.

Все вышеуказанные сорта бородатых ирисов могут быть использованы в озеленении города.

1) городские объекты ограниченного пользования и частные территории:

- *группа*: ‘Гвардейский’, ‘Русская Зима’, ‘Синяя Борода’;

- *миксбордер*: ‘Гвардейский’, ‘Русская Зима’, ‘Синяя Борода’, ‘Три Грации’.

2) городские объекты общего пользования [21]:

- *моносортная посадка*: ‘Гвардейский’.

3) частные территории:

- *моносортная посадка*: ‘Айвенго’, ‘Голубой Залив’, ‘Заросший Пруд’, ‘Союз Сердец’;

- *рабатка*: ‘Голубой Залив’, ‘Хуторок в Степи’;

- *группа*: ‘Лист Мебиуса’, ‘Хуторок в Степи’ (оптимально), ‘Шаги Командора’;

миксбордер: ‘Сердоликовая Бухта’ (рис. 4).



‘Айвенго’



‘Гвардейский’

Рисунок 4. Некоторые отечественные сорта *Iris* × *hybrida*, перспективные для использования в составе ландшафтных композиций

Figure 4. Some native cultivars of *Iris* × *hybrida*, promising for use in landscape compositions

Источник: фотография Мамаевой Н.А.

Source: photo by N.A. Mamaeva

V Интродукция ремонтантных сортов

В лаборатории декоративных растений данное направление входило в состав научной работы, но не считалось особо перспективным. Это обусловлено тем, что бородатые ирисы способны к достаточно обильному и регулярному повторному цветению только в V зоне зимостойкости. При интродукции на территориях с менее благоприятными условиями, повторное цветение проявляется не ежегодно и у большинства сортов является гораздо менее интенсивным. В коллекции с 1945 г. по 2011 г. прошли испытание 1507 сортов *Iris*, 17 % из них заявлены оригинаторами, как ремонтантные.

За период 2011–2019 гг. изучено 6 сортов – ‘Afternoon Delight’, ‘Floorshow’, ‘Glitter Repink’, ‘Harvest of Memories’, ‘Midsummer Night’s Dream’, ‘Royalty Remembered’. Согласно данным оригинаторов, у данных культиваров возможно повторное цветение. По результатам полевых исследований ремонтантность зафиксирована у всех сортов. Но повторное цветение не было ежегодным, наблюдалась периодичность: раз в 1–3 года в зависимости от сорта. Повторное цветение не было обильным: коэффициент орнаментальности не превышал 20%. В итоге изученные сорта не прошли интродукционное испытание. В составе коллекции этот признак наблюдается ежегодно только у трех

сорт, введенных в коллекцию в 90–х гг. XX в.: ‘Champagne Elegance’, ‘Cry Baby’ и ‘Tennison Ridge’. Подобные результаты связаны со степенью реализации генетических особенностей сортов, связанных с наличием разнокачественности генеративных почек, а также с регулярным отсутствием накопления необходимой для повторного цветения суммы активных температур. Поэтому в изменяющихся и очень нестабильных климатических условиях средней полосы России интродукция ремонтантных сортов, как самостоятельное активно реализуемое направление научно-исследовательской работы по расширению ассортимента сортов бородатых ирисов в составе культурной флоры региона, на наш взгляд, не имеет перспективы.

Однако, уже испытанные в интродукционном эксперименте сорта с подтвержденным регулярным повторным цветением, могут быть рекомендованы для использования в озеленении частных территорий:

- *рабатка*: ‘Cry Baby’, ‘Tennison Ridge’;
- *группа*: ‘Champagne Elegance’;
- *миксбордер*: ‘Cry Baby’, ‘Tennison Ridge’;
- *моносортная посадка*: подходят все выше

упомянутые сорта.

Цветение ирисов в нестандартные для них сроки в составе городских цветочных композиций может снижать целостность визуального восприятия ценоза. Для избегания подобного эффекта

необходим поиск нетривиальных композиционных решений, что не всегда может быть реализовано в условиях инфраструктуры современных городов.

VI Интродукция сортов I. × hybrida с модифицированной морфологией бородки

Для реализации данного направления проводился отбор сортов «космического поколения». Создание сортов с модифицированной морфологией бородки – одно из относительно новых направлений мировой селекции. Но в условиях средней полосы России этот признак реализуется не ежегодно.

За период 2011–2023 гг. в интродукционном исследовании были задействованы 8 сортов с нестандартной морфологией бородки: ‘Batter Up’, ‘Eagle Landing’, ‘Manneken Pis’, ‘Startled’, ‘Winged Angel’, ‘Голеадор’, ‘Меч Конкистадора’ и ‘Солнечная Колибри’. Большинство из них выбыли из эксперимента в первые 3 года испытаний. Основные причины – низкие отрицательные температуры в зимний период, избыточное количество влаги в периоды летней вегетации растений и их подготовки к зимовке. К гибели растений также приводило развитие инфекционных заболеваний. При этом в генеративной фазе развития наличие морфологических изменений бородки фиксировали как нестабильный признак. Полноценное проявление модификаций бородки фиксировали у 13–18% цветков (в зависимости от сорта). Интродукционные испытания не прошел ни один культивар. Таким образом, в рамках осуществленных полевых экспериментов основополагающие факторы исключения сортов из интродукционного испытания – это их биологические особенности и нестабильность проявления в фенотипе морфологических признаков бородки. Поэтому вышеперечисленные сорта бородатых ирисов нецелесообразно рекомендовать для выращивания в IV зоне зимостойкости в составе различных композиций (моносортовые посадки, рабатки, группы) ни на частных, ни на городских территориях.

Научная работа с использованием ирисов «космического поколения» в условиях IV зоны зимостойкости, на наш взгляд, может иметь некоторую перспективу только как составная часть изучения сортов с малораспространенными характеристиками.

VII Интродукция сортов из групп Aril (AR) и Arilbread (AB)

В настоящее время мировой ассортимент представителей из групп Aril и Arilbread большой. Это позволяет отбирать культивары, наиболее устойчивые в IV зоне зимостойкости.

В лаборатории декоративных растений это направление интродукционной работы является новым и нерегулярным. Часто возникают сложности с мобилизацией исходного материала. За период 2011–2023 гг. испытаны только 2 сорта: ‘Afrosiab’ и ‘Kalifa’s Horn’. ‘Afrosiab’ прошел интродукционное испытание и входил в состав коллекции 3 года. Сорт выбыл из коллекционного фонда в результате влияния длительного избыточного увлажнения почвы в период вегетации растений в сочетании с недостатком солнечной инсоляции (2019–2020 гг.) и поражения куртин возбудителями мягкой гнили корневой системы.

Сорта-представители групп Aril и Arilbread, прошедшие интродукционное испытание в границах V зоны зимостойкости, могут быть рекомендованы для применения в озеленении частных территорий. Их можно использовать в моносортовых посадках, рабатках и группах [22]. Предпочтительными следует считать моносортовые варианты, поскольку в случае существенной разницы в интенсивности цветения у разных сортов (как результат влияния каких-либо экзогенных факторов) в составе одной цветочной композиции снижение ее декоративного эффекта не будет очень акцентным.

Рекомендации к использованию сортов Aril и Arilbread в составе городского озеленения нецелесообразны, поскольку комплекс их биологических характеристик не предполагает высокой устойчивости к абиотическим факторам городской среды, а высокие декоративные характеристики определяют их низкую вандалоустойчивость.

Заключение

Создание, поддержание и расширение коллекций живых растений – одна из базовых составляющих развития функциональной компоненты современных ботанических садов. Важно, чтобы результаты научной работы имели практическое использование, в том числе и в виде рекомендаций для городского озеленения.

Согласно результатам представленной научно-исследовательской работы, для массового городского озеленения в условиях IV зоны зимостойкости в рамках современного ассортимента культивируемых представителей бородатых ирисов наиболее перспективны низкорослые сорта группы SDB, среднерослые сорта группы IB, большинство исторических сортов

Лесотехнический журнал 1/2026

и некоторые отечественные сорта (вне зависимости от их принадлежности к той или иной садовой группе). Возможности их применения в городских зеленых насаждениях, в основном, детерминированы их биологическими характеристиками из категории хозяйственно-ценных признаков.

По итогам проведенных многолетних полевых экспериментов с целью расширения разнообразия устойчивых в культуре в IV зоне зимостойкости сортов бородатых ирисов положительный результат получен по 4 перспективным для систематической реализации направлениям научно-исследовательской работы: 1) интродукция среднерослых (группы IB и BB) и низкорослых (группа SDB) сортов, как характеризующихся наибольшим адаптационным потенциалом и пластичностью; 2) интродукция сортов-представителей групп MDB и MTB, как малочисленных или малораспространенных садовых бородатых ирисов; 3) интродукция исторических сортов, как наиболее пластичных (приспособленных к меняющемуся комплексу абиотических и биотических факторов) представителей культивируемых бородатых ирисов; 4) интродукция сортов отечественной селекции, как потенциально наиболее адаптированных к почвенно-климатическим условиям региона их создания.

Малоперспективными для реализации являются 3 направления: 1) интродукция сортов с ремонтантным типом цветения, которое, как правило, не реализуется на регулярной основе; 2) интродукция сортов «космического поколения», у которых, наряду с частым наличием низкого адаптационного потенциала, в основном, крайне нерегулярно реализуются в фенотипе характерные для сортов изменения морфологии бородки; 3)

интродукция сортов Aril и Arilbread, основными факторами, лимитирующими успешность интродукции которых являются их недостаточно высокая зимостойкость и низкая устойчивость к абиотическим факторам. Таким образом, наличие у сортов таких признаков, как ремонтантность и модифицированная морфология бородки, а также принадлежность сортов к группе Aril и Arilbread делают их неперспективными для интродукции в IV зону зимостойкости, поскольку таким культурам необходимы иные условия выращивания – V зона и интенсивная агротехника (например, на частных территориях).

Устойчивость в культуре, как и адаптационный потенциал сортов бородатых ирисов слабо связаны с их принадлежностью к той или иной садовой группе в случае, если группа в целом, согласно интродукционному прогнозу, изначально перспективна для интродукции на предполагаемую территорию. Тогда эти свойства определяются, преимущественно, генетическими особенностями сортов. При этом, когда садовая группа, по предварительному прогнозу, в целом является малоперспективной, то взаимозависимость между вышеуказанными свойствами сортов и их принадлежностью к этой садовой группе имеет большое значение и является тесной.

Представленная работа вносит определенный практический вклад в современную практику озеленения, предоставляя ассортиментный список сортов бородатых ирисов, перспективных для использования в озеленении, дифференцированный по типам ландшафтных композиций.

Список литературы

1. Yang H. Research on vegetation coverage optimisation of urban landscape based on vegetation index. *International Journal of Environmental Technology & Management*. 2020; 23(5-6): 359-370. – DOI: <https://doi.org/10.1504/IJETM.2020.114136>.
2. Zubair O.A. Investigating Urban Growth and the Dynamics of Urban Land Cover Change Using Remote Sensing Data and Landscape Metrics. *Papers in Applied Geography*. 2020; 7: 67-81. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23754931.2020.1817136>.
3. Якубов Х.Г., Авдеева Е.В. Озеленение как один из методов экологизации городского пространства // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX. – № 9. – С. 480-482.
4. Петрина О.А., Стадолин М.Е. Современные проблемы и тенденции развития озеленения городских пространств // Муниципальная академия. – 2021. – № 4. – С. 174-179. – DOI: https://doi.org/10.52176/2304831X_2021_04_174.
5. Чайковская Л.В. Озеленение территории как один из показателей, обеспечивающих комфортность городской среды // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2022. – Т. 3, № 1051. – С. 31-33.
6. Dyachkova O.N. The Analysis Situation of Urban Green Space Framework in Saint Petersburg. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2022; 3(69): 12-16. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48474677&ysclid=mj16r2y1p337646612>.

7. Huang D., CAO S., ZHA W. et al. Urban greening amidst global change: A comparative study of vegetation dynamics in two urban agglomerations in China under climatic and anthropogenic pressures. *Ecological Indicators*. 2024; 159: 111739. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111739>.
8. Чернышенко О.В., Фролова В.А., Жданова Л.П. Стратегия ООН и индикаторы устойчивости экосистем для сохранения городского биоразнообразия Москвы // *Лесной вестник*. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 93-102. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-93-102>.
9. Tayefi Nasrabadi M. How do nature-based solutions contribute to urban landscape sustainability? *Environment, Development and Sustainability*. 2022; 24: 576-591. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01456-3>.
10. Zykova V., Klimenko Z., Zubkova N.V. et al. The Nikita Botanical Gardens ornamental plants collections biodiversity extension. *Acta Horticulturae*. 2021; 1324: 137-142. – DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1324.21>.
11. Реут А.А., Бекшенева Л.Ф. Сравнительная оценка эколого-физиологических особенностей видов рода *Iris* L. // *Вестник КРАСГАУ*. – 2021; Т. 7, № 172. – С. 35-42. – DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-7-35-42>.
12. Шейнина А.Л., Улановская А.Л. Варианты использования высокорослых сортов ириса гибридного в ландшафтном дизайне // *Субтропическое и декоративное садоводство*. – 2020. – № 73. – С. 181-189. – DOI: <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2020-73-181-189>.
13. Русанов Ф.Н. Новые методы интродукции растений // *Бюллетень Главного ботанического сада*. – 1950. – Вып. 7. – С. 27-36.
14. Былов В.Н. Основы сравнительной сортооценки декоративных растений // *Интродукция и селекция цветочно-декоративных растений*. – М.: Наука, 1978. – С. 7-32.
15. Методика первичного сортоиспытания коллекции ириса гибридного. – Л., 1971. – 27 с.
16. Блажек М. Принципы сохранения генофонда Бородатых ирисов // *Ежегодный Бюллетень «Ирисы России»*. – 2021. – № 29. – С. 13-30.
17. Карписонова Р.А. Принципы создания искусственных фитоценозов // *Hortus Botanicus*. – 2017. – Т. 12. – С. 454-458. – DOI: <https://doi.org/10.15393/j4.art.2017.3902>.
18. Мамаева Н.А., Кузнецова Я.В. Морфологические признаки представителей группы безбородые ирисы с точки зрения возможностей их применения в ландшафтных композициях (в стиле Natur Garden) // *Лесной вестник*. – 2022 – Т. 26, № 4. – С. 81-91. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-4-81-91>.
19. Bondorina I.A., Kabanov A.V., Mamaeva N.A., Khokhlacheva J.A. Collection Fund of the Laboratory of Ornamental Plants of the Tsitsin Main Botanical Garden: Historical Overview and Current State // *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2020; 75(2): 83-88. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S0096392520020017>.
20. Khoroshkov L., Derevianko N. Landscaping Project for a Private Garden Plot in the City of Zaporizhzhia. *Наукові горизонти*. 2021; 24(3): 68-74. – DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.68-74](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.68-74).
21. Куликова Н.А., Пятых А.М., Лаптина Ю.А., Гиченкова О.Г. 3D визуализация ландшафта на примере территории жилого дома // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. – 2021. – Т. 3, № 63. – С. 132-141. – DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-13>.
22. Plugatar S.A., Plugatar Y.V., Klimenko Z.K. et al. Genetic resources of flower and ornamental plants adapted for cultivation in the dry subtropical zone. *Acta Horticulturae*. 2022; 1334: 127-134. – DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1334.16>.

References

1. Yang H. *Research on vegetation coverage optimisation of urban landscape based on vegetation index*. *International Journal of Environmental Technology & Management*. 2020;23(5-6):359–370. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJETM.2020.114136>.
2. Zubair O.A. *Investigating Urban Growth and the Dynamics of Urban Land Cover Change Using Remote Sensing Data and Landscape Metrics*. *Papers in Applied Geography*. 2020;7:67–81. DOI: <https://doi.org/10.1080/23754931.2020.1817136>.
3. Yakubov Kh.G., Avdeeva Ye.V. *Ozelenenie kak odin iz metodov ekologizatsii gorodskogo prostranstva*. [Landscaping as one of the methods of greening urban space]. *Khvoinee borealnoi zoni = Conifers of the Boreal Area*. 2021;XXXIX(9):480–482. (In Russ.).

4. Petrina O.A., Stadolin M.E. *Sovremennye problemi i tendentsii razvitiya ozeleneniya gorodskikh prostranstv*. [Modern problems and trends in the development of urban landscaping]. Munitsipalnaya akademiya = Municipal Academy. 2021;4:174–179. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52176/2304831X_2021_04_174.
5. Chaikovskaya L.V. *Ozelenenie territorii kak odin iz pokazatelei, obespechivayushchikh komfortnost gorodskoi sredi*. [Landscaping of the territory as one of the indicators ensuring the comfort of the urban environment]. BST: Byulleten stroitelnoi tekhniki = BCM: Bulletin of construction machinery. 2022;3(1051):31–33. (In Russ.).
6. Dyachkova O.N. *The Analysis Situation of Urban Green Space Framework in Saint Petersburg*. Components of Scientific and Technological Progress. 2022;3(69):12–16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48474677&ysclid=mj16r2y1p337646612>.
7. Huang D., CAO S., ZHA W. et al. *Urban greening amidst global change: A comparative study of vegetation dynamics in two urban agglomerations in China under climatic and anthropogenic pressures*. Ecological Indicators. 2024;159:111739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111739>.
8. Chernishenko O.V., Frolova V.A., Zhdanova L.P. *Strategiya OON i indikator i ustoichivosti ekosistem dlya sokhraneniya gorodskogo bioraznoobraziya Moskvi*. [Strategy and indicators of ecosystem sustainability for the conservation of urban biodiversity in Moscow]. Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin. – 2021. – T. 25. – № 3. – С. 93–102. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-93-102>.
9. Tayefi Nasrabadi M. *How do nature-based solutions contribute to urban landscape sustainability?* Environment, Development and Sustainability. 2022;24:576–591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01456-3>.
10. Zykova V., Klimenko Z., Zubkova N.V. et al. *The Nikita Botanical Gardens ornamental plants collections biodiversity extension*. Acta Horticulturae. 2021;1324:137–142. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1324.21>.
11. Reut A.A., Beksheneva L.F. *Sravnitel'naya otsenka ekologo-fiziologicheskikh osobennostei vidov roda Iris L.* [Comparative assessment of ecological and physiological features of species of the genus *Iris* L.]. Vestnik RASGAU = Bulletin of KSAU. 2021;7(172):35–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-7-35-42>.
12. Sheinina A.L., Ulanovskaya A.L. *Varianti ispolzovaniya visokoroslikh sortov irisa gibridnogo v landshaftnom dizaine*. [Variants of using tall *Iris* × *hybrida* hort. cultivars in landscape design]. Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo = Subtropical and ornamental horticulture. 2020;73:181–189. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31360/2225-3068-2020-73-181-189>.
13. Rusanov F.N. *Novie metody introduksii rastenii*. [New methods of plant introduction]. Byulleten Glavnogo botanicheskogo sada = Bulletin of the Main Botanical Garden. 1950;7:27–36. (In Russ.).
14. Bylov V.N. *Osnovi sravnitel'noi sortootsenki dekorativnykh rastenii* [Fundamentals of comparative cultivars assessment of ornamental plants]. Nauka. (In Russ.).
15. *Metodika pervichnogo sortoisпитaniya kolleksii irisa gibridnogo* [The method of primary cultivar testing collection of the *Iris* × *hybrida*]. (In Russ.).
16. Blazhek M. *Printsipi sokhraneniya genofonda Borodatikh irisov*. [Principles of conservation of the gene pool of Bearded irises]. Yezhegodnii Byulleten «Irisi Rossii» = The Annual Bulletin "Irises of Russia". 2021;29:13–30. (In Russ.).
17. Karpisonova R.A. *Printsipi sozdaniya iskusstvennykh fitotsenozov*. [Principles of creation of the artificial plant communities]. Hortus Botanicus 2017;12:454–458. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j4.art.2017.3902>.
18. Mamaeva N.A., Кузнецова Ya.V. *Morfologicheskie priznaki predstavitelei gruppi bezborodie irisi s tochki zreniya vozmozhnostei ikh primeneniya v landshaftnikh kompozitsiyakh (v stile Natur Garden)*. [Morphological features of beardless iris group and their application in landscape compositions (in Natur Garden style)]. Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin. 2022;26(4):81–91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-4-81-91>.
19. Bondorina I.A., Kabanov A.V., Mamaeva N.A., Khokhlacheva J.A. *Collection Fund of the Laboratory of Ornamental Plants of the Tsitsin Main Botanical Garden: Historical Overview and Current State*. Moscow University Biological Sciences Bulletin. 2020;75(2):83–88. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0096392520020017>.
20. Khoroshkov L., Derevianko N. *Landscaping Project for a Private Garden Plot in the City of Zaporizhzhia*. Науковий горизонт = Scientific horizons. 2021;24(3):68–74. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(3\).2021.68-74](https://doi.org/10.48077/scihor.24(3).2021.68-74).
21. Kulikova N.A., Pyatikh A.M., Laptina Yu.A., Gichenkova O.G. *3D vizualizatsiya landshafta na primere territorii zhilogo doma*. [3D visualization of the landscape on the example of the territory of an apartment building]. Izvestiya

Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i visshee professionalnoe obrazovanie = Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex. 2021;3(63):132–141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2021-03-13>.

22. Plugatar S.A., Plugatar Y.V., Klimenko Z.K. et al. *Genetic resources of flower and ornamental plants adapted for cultivation in the dry subtropical zone*. Acta Horticulturae. 2022;1334:127–134. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1334.16>.

Сведения об авторах

✉ Мамаева Наталья Анатольевна – кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории биотехнологии, ФГБНУ «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН», ул. Ботаническая, 4, г. Москва, Российская Федерация, 127276, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1191-5965>, e-mail: mamaeva_n@list.ru.

Хохлачева Юлия Анатольевна – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории декоративных растений, ФГБНУ «Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН», ул. Ботаническая, 4, г. Москва, Российская Федерация, 127276, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1883-8704>, e-mail: ldr_gbsran@mail.ru.

Information about the authors

✉ Natalia A. Mamaeva – Cand. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences, Botanicheskaya str., 4, Moscow, Russian Federation, 127276, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1191-5965>, e-mail: mamaeva_n@list.ru.

Julia A. Khokhlacheva – Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher, Laboratory of Ornamental Plants, Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences, Botanicheskaya str., 4, Moscow, Russian Federation, 127276, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1883-8704>, e-mail: ldr_gbsran@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author

Лесомелиоративный потенциал защитного лесоразведения в Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации

Николай Н. Харченко¹, hnn-vrn@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>

Алексей Н. Цепляев¹, vsealexey@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>

Елена А. Колесниченко², ekolesnichenko@live.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5296-7625>

Наталья В. Рыбалкина³, rybnv@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8514-9047>

Владимир Д. Тунякин³, ksolnauka@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6766-8318>

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

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»,
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392622, Российская Федерация

³Воронежский ФАНЦ им. В.В. Докучаева, Воронежская область, Таловский район,
п. 2 участка Института им. Докучаева, квартал 5, дом 81, 397463, Российская Федерация

В условиях Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации, характеризующейся высокой распаханностью земель и развитием деградационных процессов, защитные лесные насаждения выполняют ключевую средообразующую и ресурсосберегающую функцию. Цель исследования – оценка лесомелиоративного потенциала полезащитных лесонасаждений различного состояния и обоснование перспектив их использования в агролесоводственных системах. Объектами изучения служили 46 полезащитных лесных полос, расположенных на чернозёмных почвах в Каменной Степи, Семилукском и Хохольском районах Воронежской области. Работы выполнены с применением методов рекогносцировочного и инструментального обследования, закладки временных пробных площадей, таксационных описаний и лесоводственно-мелиоративной оценки по шкале Е.С. Павловского и Правилам санитарной безопасности в лесах. Установлено, что исследуемые насаждения находятся в возрастном диапазоне 20–126 лет, различаются по породному составу, конструкции и санитарному состоянию. На основе анализа количественных и качественных лесоводственных факторов выделены три модели лесных полос: полностью утратившие целевое назначение (подлежат замене), частично утратившие функции (требуют реконструкции) и сохранившие высокую эффективность (нуждаются в системном уходе). Это позволило систематизировать земельные площади по уровню агромелиоративного потенциала. К первой группе отнесены насаждения с высокой лесомелиоративной эффективностью (класс ЛМО 5а–4б), не требующие оперативных мероприятий; ко второй – насаждения с невысоким потенциалом (ЛМО 3а–3б), жизнеспособные при реконструкции; к третьей – погибшие или неудовлетворительной сохранности (ЛМО 2–0), нуждающиеся в полной замене. Четвёртую группу составляют низкопродуктивные земли сельскохозяйственного назначения, пригодные для реализации лесоклиматических проектов с нулевой базовой линией. Показано, что наиболее устойчивыми и продуктивными являются насаждения с участием дуба черешчатого, клёна остролистного, при своевременном проведении лесоводственных уходов. Высокий мелиоративный потенциал также демонстрируют монопородные тополевые и берёзовые лесополосы в возрасте 20–30 лет при ажурно-продуваемой конструкции. Установлена практически 100 % гибель ясеня обыкновенного и ясеня пушистого вследствие поражения изумрудной узкотелой златкой, что требует исключения этих пород из состава создаваемых защитных насаждений. Полученные результаты позволяют дифференцированно подходить к планированию мероприятий по сохранению, реконструкции и новому лесоразведению, а также служат основой для интеграции защитных лесных насаждений в региональные стратегии устойчивого развития и лесоклиматические проекты.

Ключевые слова: агролесоводство, агромелиорация, лесомелиоративный потенциал, ползащитные насаждения

Финансирование: исследование проведено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FZUR-2024-0001.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лесомелиоративный потенциал защитного лесоразведения в Центральной лесостепи Европейской части Российской Федерации / Н. Н. Харченко, А. Н. Цепляев, Е. А. Колесниченко, Н. В. Рыбалкина, В. Д. Тунякин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 283–303. – Библиогр.: с. 300–302 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/18>.

Поступила 08.07.2025. Пересмотрена 09.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликовано онлайн 27.03.2026.

Article

Forest reclamation potential of protective afforestation in the Central Forest-Steppe of the European part of the Russian Federation

Nikolay N. Kharchenko¹, hnn-vrn@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>

Alexey N. Tseplyaev¹, vsealexey@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>

Elena A. Kolesnichenko², ekolesnichenko@live.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5296-7625>

Natalia V. Rybalkina³, rybnv@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8514-9047>

Vladimir D. Tunyakin³, ksolnauka@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6766-8318>

¹*Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov,*

8 Timiryazev Str., Voronezh, 394087, Russian Federation

²*Tambov State University named after G.R. Derzavin, 33 Internatsionalnaya Str.,*

Tambov, 392622, Russian Federation

³*Voronezh Federal Agrarian Scientific Centre named after V.V. Dokuchaev, Voronezh region,*

Talovsky district, settlement 2 of the Dokuchaev Institute plot, 5th quarter, building 81, 397463, Russian Federation

Abstract

In the Central Forest-Steppe of the European part of the Russian Federation, characterized by high plowed area and progressing degradation processes, protective forest plantations perform a key environment-forming and resource-saving functions. The aim of the study is to assess the forest reclamation potential of shelterbelts of different conditions and to substantiate the prospects for their use in agroforestry systems. The objects of study were 46 shelterbelts located on black soils in the Kamennaya Steppe, Semiluksky and Khokholsky districts of the Voronezh Region. The work was carried out using reconnaissance and instrumental survey methods, laying temporary test areas, taxation descriptions, and forestry reclamation assessment according to the E.S. Pavlovsky scale and the Forests Sanitary Safety Regulations. It was found that the studied plantations are in the age range of 20-126 years, differing in their species composition, structure, and sanitary condition. Based on the analysis of quantitative and qualitative forestry factors, three models of forest belts have been identified: those that have completely lost their intended purpose (subject to replacement), those that have partially lost their functions (require reconstruction), and those that have retained high efficiency (need systematic care). This made it possible to classify land areas according to the level of agroreclamation potential. The first group includes plantations with high forest reclamation efficiency (Forest reclamation assessment class 5a–4b) that do not require

operational measures; the second group includes plantations with low potential (Forest reclamation assessment class 3a–3b) that are viable under reconstruction; the third group includes dead or poorly preserved plantations (Forest reclamation assessment class 2–0) that need complete replacement. The fourth group consists of low productivity agricultural lands suitable for implementing forest-climatic projects with a zero baseline. It has been shown that the most stable and productive plantings are those with the participation of *Quercus robur* and *Acer platanoides* and timely forest management. High reclamation potential is also demonstrated by mono species poplar and birch forest belts aged 20–30 years with tracery windswept structure. It has been found that practically 100% mortality of *Fraxinus excelsior* and *Fraxinus pubescens* due to the damage caused by the *Agrilus planipennis*, which requires excluding these species from the composition of the created protective plantations. The obtained results allow for a differentiated approach to planning measures for preservation, reconstruction, and new afforestation, as well as serve as a basis for integrating protective forest plantations into regional sustainable development strategies and forest-climatic projects.

Keywords: *agroforestry, agricultural reclamation, forest reclamation potential, shelterbelts*

Funding: The study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZUR-2024-0001.

Acknowledgements: the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Kharchenko N. N., Tseplyaev A. N., Kolesnichenko E. A., Rybalkina N. V., Tunyakin V. D. (2026). Forest reclamation potential of protective afforestation in the Central Forest-Steppe of the European part of the Russian Federation. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 283–303 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/18>.

Received 08.07.2025. **Revised** 09.02.2026. **Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

Введение

Актуальность. На современном этапе хозяйствования около 75 % площади суши подвергаются деградации в результате негативного воздействия, в том числе антропогенного, и этот показатель перманентно увеличивается. Согласно последним оценочным докладом Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC AR6, 2021–2023), антропогенное воздействие привело к глобальному потеплению на 1,1 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем, вызывая беспрецедентные изменения в климатической системе. Особое внимание уделяется роли лесных экосистем, которые поглощают $2,6 \pm 0,7$ Гт CO₂/год и являются критическими компонентами глобального углеродного цикла [1]. В этих условиях системы агролесомелиорации обладают значительным потенциалом для достижения многочисленных целей устойчивого развития экосистем, выступая инструментом адаптации к климатическим изменениям, сохранения почвенного

плодородия и повышения продуктивности агроландшафтов.

Центральная лесостепь представляет собой регион, обладающий высоким агроэкономическим потенциалом, что обусловлено, в первую очередь, исключительным качеством ее земельных ресурсов. В агрономическом контексте это понятие имеет вполне конкретное содержание, хотя не является административным или географическим термином в строго формальном смысле. В лесостепной зоне полностью располагаются более десяти регионов. Высокая распаханность земель, низкая лесистость, сокращение площадей естественных кормовых угодий приводят к системной экологической деградации агроландшафтов Центральной лесостепи, что проявляется в прогрессирующем развитии эрозионных процессов, нарушении гидрологического режима, снижении биоразнообразия и потере природной устойчивости экосистем. Данные процессы носят взаимно усиливающийся характер и приводят к утрате плодородных черноземных почв. В этих условиях

требуется реализация комплексного подхода к восстановлению экологического баланса территорий, включающего оптимизацию структуры землепользования с увеличением доли защитных лесонасаждений, сохранение и восстановление естественных луговых экосистем, а также внедрение почвозащитных систем земледелия.

Защитные лесные насаждения в регионе играют ключевую роль в стабилизации микроклимата, снижении ветровой и водной эрозии почв, поддержании биологического разнообразия и формировании экосистемных услуг. Научно-методические основы защитного лесоразведения были заложены в конце XIX века после экспедиции В.В. Докучаева, организованной в 1890-х годах для решения задач защиты от суховеев степного ландшафта [2]. Применительно к Центральной лесостепи ключевым считается период с 1950 по 1965 годы, когда на данной территории был реализован план развития полезащитных лесных насаждений [3].

Международные исследования подтверждают, что традиционные агролесоводческие системы в Европе представляют собой интерфейс между сельским хозяйством и сохранением биоразнообразия, обеспечивая устойчивое производство и поддерживая разнообразные экосистемы [4]. Как отмечается в систематическом обзоре, опубликованном в 2025 году, такие системы предоставляют многообразные экосистемные услуги: секвестрацию углерода, повышение плодородия почв, регуляцию водного баланса и сохранение культурного наследия [4]. В странах Европы, Азии и Африки акцентируются преимущества систем агролесоводства, обеспечивающих увеличение органического вещества в почве, регулирование водного баланса, создание среды обитания для полезных организмов и повышение экономической устойчивости сельских территорий [5, 6].

Изучению вопросов развития агролесоводства в Центральной лесостепи посвящены работы Михина В.И. и Михиной Е.А. [7]. Следует отметить работы Танюкевича В.В. [8], в которых исследована роль и принципы формирования лесозащитных насаждений, Турусова

В.И. [9], где уделено внимание механизмам воспроизводства биологических ресурсов на основе агролесоводства, Проездова П.Н. [10], где представлена сравнительная оценка плантационных лесомелиоративных насаждений по отношению к повышению биоразнообразия в агролесоводстве. В работах Е.А. Корнеевой и А.И. Беляева [6] изучены принципы и эколого-экономическая результативность создания агролесомелиоративных систем в засушливых условиях Нижнего Поволжья. Также одной из тем научных дискуссий остаются сами эффекты агролесомелиоративных насаждений. Этому вопросу посвящена работа Левиной И.В. [11], которая указывает как на прямые эффекты от мероприятий агролесомелиорации (высадки защитных лесных насаждений), так и на косвенные.

В последние годы научное сообщество и практики уделяют все больше внимания экономическим аспектам агролесоводства, рассматривая его не только как меру экологической и климатической устойчивости, но и как инструмент повышения доходности агропредприятий, активизации инвестиционной деятельности и формирования новых рынков экосистемных услуг, включая углеродные кредиты [10, 6]. Как отмечается в исследовании Морковиной С.С. и соавторов (2025), в России системы защитных лесных насаждений в их текущем состоянии не обеспечивают необходимого эффекта для развития климатически ориентированных проектов, что требует пересмотра подходов к их созданию и реконструкции [12].

В странах Восточной Европы, в частности в Украине, десятилетия недостаточного финансирования и военные разрушения привели к широкомасштабной деградации полезащитных лесных полос, в то время как внедрение агролесоводства остается ограниченным из-за неопределенности землепользования, фрагментированной ответственности и ограниченного доступа к финансированию. Исследования показывают, что устранение неопределенности в землепользовании, внедрение целевого софинансирования и обеспечение доступа к платежам за экосистемные услуги и добровольным углеродным рынкам могут открыть масштабное

финансирование для восстановления защитных насаждений [5, 6].

В России в последние годы активно развивается направление лесоклиматических проектов. По данным на 2025 год, в стране зарегистрировано 82 климатических проекта, из них три реализуются в Арктической зоне [13]. Воронежским государственным лесотехническим университетом разработан и зарегистрирован климатический проект «Зеленый щит» для Волгоградской ТЭЦ-3, предусматривающий создание защитных насаждений на площади 5,19 га с прогнозируемым накоплением более 2 тыс. тонн CO₂ за 15 лет [14]. Оценки показывают, что к 2030 году секвестрационный потенциал лесов Центральной лесостепи может быть увеличен на 28–30 %, что позволит нейтрализовать до 12 % выбросов промышленных предприятий региона [8].

Таким образом, набор экосистемных услуг, который предоставляют агролесомелиоративные насаждения, разнообразен и оказывает непосредственный эффект как на гидрологический баланс почв, так и на поглощение парниковых газов. При этом реализация экосистемных услуг защитными насаждениями сопровождается и опосредованным, но, по мнению специалистов, главным воздействием на урожайность и развитие сельского хозяйства, что позволяет говорить о влиянии агролесомелиорации на продовольственную безопасность страны. Эффективность агролесоводства достигается за счёт правильного подбора пород, а также технологии проведения соответствующих мероприятий.

Цель исследования – выявление лесомелиоративного потенциала защитного лесоразведения в Центральной лесостепи Европейской части РФ и определение перспектив создания агролесоводственных систем различного назначения на данных территориях.

Материалы и методы

Объект и район исследований

Объектом исследования являются полезащитные лесные насаждения различного состояния, произрастающие на чернозёмных почвах в условиях Центральной лесостепи Европейской России. Район исследований охватывает

территорию Воронежской области, где агролесоводство получило наибольшее развитие. Для региона характерна высокая (около 70 %) распаханность земель, повторяющиеся засухи и усиливающаяся антропогенная нагрузка на фоне изменений климата в последние десятилетия. В качестве модельных объектов выбраны агролесоводственные системы, расположенные в Семилукском, Хохольском и Таловском районах, а также на территории Каменной степи (Таловский район).

Материалы

исследования

Материалами послужили результаты инструментальных и рекогносцировочных обследований 46 полезащитных лесных полос, выполненных в Каменной степи, Хохольском и Семилукском районах Воронежской области. Дополнительно использованы нормативно-справочные материалы, литературные источники, данные таксационных описаний и лесоустройства (при их наличии), а также актуальные сведения о проведённых и планируемых лесохозяйственных мероприятиях (санитарные рубки, расчистка, корчёвка, уход, дополнение). Для параметризации роста и структуры фитомассы при моделировании применялись опубликованные таблицы хода роста и фитомассы для полезащитных лесных полос на чернозёмных почвах, а также материалы по биологической продуктивности древесных пород. Базовый массив ростовых характеристик для древостоев лесных полос формировался по обобщённым данным В.А. Усольцева [15] (дуб, берёза, ясень). При отсутствии специализированных таблиц для лесных полос соответствующих пород использовались таблицы хода роста для модальных насаждений в пределах экорегионов зоны смешанных и лиственных лесов и лесостепи, а также таблицы биологической продуктивности [16], позволяющие восстанавливать структуру фитомассы и рассчитывать доли её компонентов (для клёна, осины).

Полевые исследования проводились в конце мая – июне, в период вегетации, при полном облиствении насаждений. Возраст насаждений определяли по архивным и литературным данным (за 1905, 1940 и 1952 гг.) с учётом дифференциации

возрастных классов: для твердолиственных пород установлен класс в 10 лет, для мягколиственных (тополь, берёза повислая) – в 5 лет. Возраст спелости для твердолиственных пород принят 81–90 лет, для мягколиственных – 41–50 лет, что обусловлено спецификой роста и развития защитных лесных полос, отличающейся от естественных лесов.

Закладка пробных площадей и таксационные работы

Исследования выполнены по общепринятым методикам закладки пробных площадей в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки» (1983). Временные пробные площади закладывались из расчёта охвата измерениями не менее 200 деревьев главной породы; на них проводили однократные перечёты древесных и кустарниковых видов. Для лесоучётных работ также использовались пробные площади, установленные в ходе предыдущих таксационных исследований 1952 и 1992 гг.

Перед началом работ выполнялось предварительное исследование для определения границ лесоучётных площадок. Выделялись участки лесополос, различающиеся по происхождению, составу и другим характеристикам. В ряде случаев таксировались отдельно участки опытных насаждений, заложенных по разным схемам смешения или типам культур. Границы лесных полос определяли с помощью мерной ленты и на основе данных предыдущих таксаций; в нескольких точках измерялась ширина боковых и торцевых опушек по внешним границам крон. Площадь, занимаемая древостоем отдельной лесной полосы, определялась суммированием первоначальной площади при посадке и среднего диаметра кроны одного дерева главной породы первого яруса.

Площадь пробных участков зависела от возраста насаждения: в молодняках и средневозрастных древостоях она составляла 0,10–0,15 га, в приспевающих и спелых – не менее 0,20 га (за исключением случаев, когда площадь выдела была меньше указанного размера). Если защитное насаждение делилось на отдельные участки, новые пробные площади закладывались и фиксировались в таксационных журналах с указанием местоположения.

Измерение таксационных и мелиоративных параметров

На каждой пробной площади проводился сплошной перебор деревьев по диаметру на высоте груди (1,3 м) с распределением по ступеням толщины в 4 см. Высоту деревьев каждой породы измеряли высотомером (клинометром) SUUNTO PM-5/1520 по трём ярусам. Диаметр определяли мерной вилкой текстолитовой 600 мм, возраст – возрастным буравом 300 мм. Для определения среднего диаметра с точностью $\pm 10\%$ по методу случайной выборки измеряли толщину 10 стволов в каждой ступени толщины и вычисляли среднее значение.

Породный состав устанавливали по площади сечения стволов на высоте груди, что соответствует составу, выраженному через объём стволовой древесины каждой породы. Густоту подроста оценивали по шкале А.В. Вагина. Для изучения засорённости живого напочвенного покрова применяли количественный метод: на однородной территории закладывали учётные площадки размером 5×5 м и подсчитывали количество сорных растений каждого вида [17].

Особенности конструкции защитных насаждений определяли оптическим методом [18] – на фотоотпечаток продольного профиля насаждения накладывали сетку 1×1 см и подсчитывали долю просветов по каждому уровню.

Визуально описывали подрост, подлесок, почвенный покров, определяли сомкнутость крон. Фиксировали наличие или отсутствие задернения почвы, сухостоя, следов несанкционированных рубок. Определяли мелиоративные параметры: пространственную ориентацию, схему смешения, количество рядов, расстояние между рядами и посадочными местами в ряду, фактический тип конструкции лесополосы на момент исследования [19].

Оценка состояния насаждений

Лесоводственно-мелиоративная оценка защитных насаждений выполнялась по методике Е.С. Павловского [21]. Категорию санитарного состояния определяли в соответствии с Правилами санитарной безопасности в лесах № 2047 [22].

В составе насаждений на обследованных объектах отмечены следующие древесные породы: осина (О), тополь дрожащий (Тд), тополь бальзамический (Тб), берёза повислая (Б), клён остролистный (Ко), дуб черешчатый (Д), ясень обыкновенный (Яо). Кустарниковые породы представлены жимолостью настоящей (обыкновенной). В утративших жизнеспособность насаждениях главных пород под усыхающим пологом в массовом количестве поселяется клён ясенелистный (Кяс).

На территории Каменно-Степного опытного лесничества объектами анализа служили лесные полосы возрастом от 33 до 126 лет. Более молодые насаждения (20–45 лет) исследовались в Семилукском и Хохольском районах Воронежской области. Средняя площадь, занимаемая одним насаждением, колебалась от 0,01 до 0,27 га.

Результаты

В ходе полевых исследований и камеральной обработки получены количественные и качественные характеристики 46 полей защитных лесных полос, расположенных в Каменной Степи (Таловский район), а также в Семилукском и Хохольском районах Воронежской области. Анализ выполнен с учётом лесоводственных факторов (состав, запас, полнота, конструкция) и качественных показателей (санитарное состояние, долговечность пород). Для обобщения материалов использованы данные предыдущих таксаций, архивные сведения и результаты натурных измерений 2025 г. Проанализированы данные предыдущих таксаций исследуемых лесонасаждений. При создании лесных полос Каменно-Степного оазиса, начиная с работ Особой экспедиции В.В. Докучаева (1892–1898 гг.) и до 1930-х годов, в Каменную Степь завозилось значительное количество посадочного материала из разных регионов России и СССР, включая интродуценты Европы, Канады, Китая. Наряду с посадочным материалом для обустройства экспедиции завозились брёвна и дрова, что способствовало заносу лесных вредителей и инфекционных агентов. Самое старое из насаждений – лесная полоса № 34, возраст которой составляет 126 лет. Полоса создавалась Г.Ф.

Морозовым по древесно-кустарниковому типу; образцом для подбора пород послужил породный состав Шипова леса, расположенного в 37 км от места закладки лесных полос Каменной Степи. В ходе исследований проведена визуальная и детальная оценка древесных пород, составляющих обследуемые насаждения. Краткая характеристика лесных защитных насаждений (ЛЗН) при их закладке в Каменно-Степном опытном лесничестве представлена в табл. 1.

За 100-летний период видовой состав древесных пород и кустарников стабилизировался, остались наиболее устойчивые к условиям переходной зоны от лесостепи к степи породы, а с ними и их болезни и вредители. Наиболее часто встречающиеся породы на пробных площадях: дуб черешчатый – присутствует почти во всех лесных полосах (90 %), клён остролистный – широко распространён, ясень (пушистый, обыкновенный) – встречается в 70 % обследованных лесных полос, состояние неудовлетворительное, вяз (обыкновенный) – часто встречается (до 90 %), но также с признаками ослабления. Реже встречаются: липа, берёза, лиственница, тополь, акация белая, груша лесная, рябина. Наибольшее количество деревьев наблюдается в лесной полосе № 211д (клён остролистный – 649 дер./га), а также ясень пушистый в лесной полосе № 189 (679 дер./га). Наибольший запас древесины имеют дуб черешчатый (лесная полоса № 133б – 543,78 м³/га) и берёза пушистая (лесная полоса № 250 – 647,23 м³/га). При этом общий запас древесины в полосе № 250, сформированной дубом и берёзой (состав 6Д4Б), составляет 836,63 м³/га.

Лесопатологическая оценка насаждений проведена одновременно с таксацией на тех же учётных площадках. При визуальном обследовании в основном встречались поперечный рак дуба, мучнистая роса на листьях дуба, плодовые тела трутовиков. На подросте клёна остролистного отмечена чёрная пятнистость листьев, на липе – трутовики, на вязе – голландская болезнь. Ясени поражены вредителями (валежник и сухостой). Общее состояние древостоя варьирует от здорового до сильно ослабленного в зависимости от породы и местоположения. Дуб черешчатый является

доминирующей и наиболее устойчивой породой в данных условиях. Ясень находится в критическом состоянии и требует мониторинга и санитарных мероприятий. Клён остролистный демонстрирует хорошую жизнеспособность, но в некоторых полосах также отмечается ослабление. Вяз и берёза в отдельных полосах сильно ослаблены. Категории санитарного состояния распределились следующим образом: дуб черешчатый в основном имеет 1-ю или 2-ю категорию (здоровые); ясень часто имеет 4-ю или 5-ю категорию (сильное ослабление или усыхание) в результате поражения ясеневой узкотелой изумрудной златкой [24]; вяз в большинстве случаев имеет 2-ю или 3-ю категорию (ослабленные); клён остролистный – 1-ю и 2-ю (без признаков ослабления); берёза в некоторых полосах (например, № 164а) имеет 5-ю категорию (полное выпадение).

Наибольшую продуктивность на всей пробной площади имеют три лесные полосы: № 250 (состав 6Д4Б) – 836,63 м³/га; № 1336 (10Д с примесью ясеня и клёна) – 596,82 м³/га; № 252 – 542,97 м³/га. Наименьший запас отмечен у полос № 117а и № 204 (99,16 и 177,26 м³/га). Дубовые насаждения показывают высокую продуктивность даже в 126-летнем возрасте (полосы № 28 и № 34). Преобладают лесные полосы с древостоями возраста 69–85 лет. Наиболее продуктивные лесные полосы: № 250 (КС=2,53) – высокий запас при удовлетворительном состоянии; № 1336 (КС=1,07) – максимальная продуктивность при отличном состоянии; № 252 (КС=1,69). Возраст формирования максимальной продуктивности – 50–85 лет, молодые берёзовые насаждения (лесная полоса № 254) имеют высокий потенциал роста.

Лесные полосы Семилукского и Хохольского районов Воронежской области

В отличие от Каменной Степи, по Хохольскому и Семилукскому районам практически отсутствуют архивные материалы ранее проведённых обследований, в связи с чем выполнить подробный анализ динамики развития насаждений не представляется возможным. Однако натурная таксация насаждений, выполненная в полевой сезон 2025 г., дала полную информацию об их современном состоянии. Лесополосы обследованы

на временных пробных площадях, заложенных в соответствии с ОСТ 56-69-83. Материалы полевых исследований дают основание сформировать обобщённую характеристику изученных защитных лесных насаждений. Анализ данных показывает, что защитные лесные насаждения создавались в различные временные этапы в целях защиты полей от суховея и иных неблагоприятных погодных явлений. Их возраст колеблется в пределах 20–40 лет (табл. 2).

Высота по главной породе колеблется в пределах 8–27,4 м. Наибольшую высоту демонстрируют тополевые насаждения, наименьшую – берёзовые. Средний диаметр варьирует от 8 см в молодых тополевых до 31 см в средневозрастных дубовых. Задернение почвы отмечается, как правило, в молодых продуваемых насаждениях из тополя, поскольку крона тополя компактна, расположена достаточно высоко и не перекрывает доступ света для развития напочвенного покрова.

Сухостой массово образуется в лесополосах начиная с 30-летнего возраста, на который приходится пик конкурентной борьбы внутри формирующегося насаждения. Особенно подвержены образованию сухостоя защитные насаждения из осины и вяза шершавого. Следов несанкционированных рубок в процессе проведения исследования ни в одном насаждении не обнаружено, что является следствием полного отсутствия спроса на мелкотоварную и низкосортную древесину в регионе.

Насаждения продуваемой конструкции являются наиболее распространёнными (66,6 %) в районе исследования. Защитные лесные насаждения непродуваемой конструкции, как проектируемые таким образом изначально, так и трансформировавшиеся в отсутствие рубок ухода, занимают второе место по распространённости (26,7 %). Насаждения ажурно-продуваемой конструкции представлены в наименьшей степени (6,7 %). Отмеченные тенденции позволяют сделать вывод, что наиболее используемой является продуваемая конструкция. Однако насаждения ажурно-продуваемой конструкции с возрастом, а значит и

разрастанием кроны, могут переходить в категорию «продуваемые».

Для объективной дифференциации обследованных насаждений по степени выполнения ими средообразующих и защитных функций была применена комплексная оценка, включающая два компонента. Лесоводственно-мелиоративная оценка проведена по методике и шкале Е.С. Павловского [21], что позволило определить соответствие лесных полос целевому назначению с учётом их конструкции, породного состава и состояния. Параллельно выполнена оценка санитарного

состояния по шкале категорий, установленной Правилами санитарной безопасности в лесах [22], что дало возможность охарактеризовать уровень жизнеспособности древостоев и степень поражения патогенами. Совместное использование указанных подходов обеспечило системную характеристику насаждений, различающихся по продуктивности и состоянию.

Таблица 1

Краткая характеристика лесных защитных насаждений (ЛЗН)
при их закладке в Каменно-Степном опытном лесничестве Таловского района

Table 1

Brief description of protective forest plantings (FP)
during their establishment in the Kamennno-Stepnoye experimental forestry, Talovsky district

ЛЗН FP	Длина, ширина, площадь, м ² Length, width, area, m ²	Породный состав при посадке Species composition at planting	Число посадочных мест, шт. Number of planting sites, pcs.	Ширина междурядий, м Row spacing, m	Год создания Year of establishment
54	900×12,5 S=1,12	Б, Д, Дкр, Яо, Ко, Ряб	4000	2,5	1992
52	1140×12,5 S=1,42	Д, Б, Ко	5000	2,5	1974
50	1239×12,5 S=1,54	Д, Б, Яо, Ко	5000	2,5	1973
16а	700 × 22 S=1,54	Т, Лп, Ко, Яо, Д ед.	610	7×2	1961
16б	460 × 26 S = 1,19	Т, Яо, Ко, Д, Лп, Ряб ед.	1082	3×2	1961
11б	180×22 S=0,24	Б	750 гнёзд nests	7×1,6	1961
11д	110×22 S= 0,24	Лс - Лиственница сибирская	750 гнёзд nests	7×1,6	1961
11е	100×22 S= 0,22	Лс +Ко	750 гнёзд nests	7×1,6	1961
63	1047 ×21 S=2,2	Т, Д, Ко, Ряб	740 гнёзд nests	7×1,6	1959
64	950×26 S=2,47	Б, Д, Вм, Во, Яо, Ко	580 гнёзд nests	8×2	1956
56	770×22 S=1,69	Б, Д, В, Т, Яп, Ко, Ряб	6000	3×5	1955- 1957
		Б, Д, Т, Яп, Ко, Ряб	714 гнёзд nests	10×1,4	1955- 1957
55	516×34 S=1,75	Т, Д, Ко, В, Б, Ряб, кустарники	5110	2,3	1955
89	1200×18 S=2,16	Яп, Д, Кяс, В	8011	2,5	1952
35а	1032×30 (685×30) S=2,06	Д, Яп, Кяс, Ко, Т	6610	0,9×0,7	1951
35б	371×30 S=1,11	Д	4500	1,5×0,5	1951

Экология

ЛЗН FP	Длина, ширина, площадь, м ² Length, width, area, m ²	Породный состав при посадке Species composition at planting	Число посадочных мест, шт. Number of planting sites, pcs.	Ширина междурядий, м Row spacing, m	Год создания Year of establishment
04	2850×24 S=6,84	Кяс, Яп, Д, В	6320	1,5×0,7	1951
33а	1301×22 S=2,86	Д	10598	3×5	1950
33б	677×25,5 S=1,73	Д, кустарники	20578	3×5	1950
33в	627×23 S=1,44	Д	7319	3×5	1950
24	266×24 S=0,64	Д, Яп, Кяс	3717	1,5×0,7	1941
17	520×10 S=0,52	Кяс, Ко, Аб, Кяв, Яп, Во, Т	6790	1,5	1940
18	466,7×9 S=0,42	Б, Т, Кяс, Яп, Кт, Д, Ряб, Во	4620	1,5	1940
8	426,7×21,3 S=0,91	Д, Ябл, Лп, Гр, птелея, лещина, Аж, жимолость, бересклет	10000	1,4×0,7	1899

Таблица 2

Краткая характеристика лесных защитных насаждений (ЛЗН)
Семилукского (С) и Хохольского (Х) районов Воронежской области

Table 2

Brief description of protective forest plantings (FP) Semiluksky (C) and
Khokholsky (X) districts of the Voronezh region

№ ЛЗН / район № FP / District	Площадь, га Area, ha	Конструкция* ЛЗН Design	Год посадки Year Planting	Состав насаждения Composition	Высота (по главной породе), м Height (by main species), m	Диаметр (средний), см Diameter (average), cm
9 / X	,15	ПЛ. 4-х рядная, 3,0×1,0 м	1985	8Тд2Тб	20,5	24
10 / X	,1	ПЛ. 3 ряда. 3,0×2,0 м	1985	10Вш	19	18
13 / X	,2	ПР. 3 ряда. 3,0×1,0 м	2000	10Тб	22	20
15 / X	,1	ПР. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1995	10Тб	23	26
48 / С	,25	ПР. 1 ряд шаг посадки 2,0 м	1995	10Тб	12	24
50 / С	,21	ПР. 1 ряд шаг посадки 2,0 м	2005	10Тб	12	10
51 / С	,76	ПР. 1 ряд шаг посадки 2,0 м	2005	10Тб	13	12
52а / С	,12	ПР. 5 рядов. 3,0×1,5 м	2005	10Б	8	12
58 / С	,2	ПР. 5 рядов 3,0×1,5 м	1995	10Б	11	18
1 / X	,15	ПР 4 ряда. 3,0×1,0 м	1985	9Кло1Д	19	29
2 / X	,19	ПЛ. 4 ряда. 3,0×1,0 м	1995	7Кло3Д	13	17

№ ЗПН / район / № FP / District	Площадь, га / Area, ha	Конструкция* ЗПН Design	Год посадки Year Planting	Состав насаждения Composition	Высота (по главной породе), м Height (by main species), m	Диаметр (средний), см Diameter (average), cm
3 / X	,17	ПР. 4 ряда. 3,0×1,0 м	1995	7Кло3Д	14	26
4 / X	,17	ПЛ. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1985	10Д	17	31
1 0 / C	,1	ПЛ. 4 ряда. 3,0×1,0 м	1995	5Яо5Кл	11	20
4 9 / C	,55	ПР. 1 ряд шаг посадки. 1,0 м	2005	10Тб	13	17
2 / C	,64	ПР. 2 ряда. 3,5×0,5 м	1995	5Тб5Яо	14,5	27
5 26 / C	,36	ПР. 5 рядов. 3,0×1,5 м	2005	10Б	11,5	16
1 4 / C	,21	ПР. 5 рядов. 3,0×1,5 м	2005	4Тб6Кло	11,5	17
8 / X	,1	А-ПР. 4 ряда. 3,0×1,5 м	1995	5Ос5Тб	18	23
1 1 / X	,2	А-ПР. 3 ряда 3,0×2,0 м	1995	10Тб	17	20
1 2 / X	,1	ПЛ. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1995	10Тб	20	20
1 4 / X	,2	ПР. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1995	10Тб	22	30
1 / C	,1	ПЛ. 4 ряда. 3,5×0,5 м	2005	10Тб, кустарник	21,9	14
2 / C	,64	ПР. 2 ряда. 3,5×0,5 м	2005	5Тб5Яо	27,4	15
4 / C	,1	ПЛ. 4 ряда. 3,5×0,5 м	2005	7Яс3КлО	26,3	11
5 / C	,1	ПЛ. 3 ряда. 3,5×0,5 м	2005	10Тб, жимолость	24,0	10
3 / C	,21	ПЛ. 4 ряда. 3,5×0,5 м	2005	5Тб5Яо	22,6	12
5 / X	,1	ПЛ. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1995	10Тб	16,4	27
6 / X	,1	ПЛ. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1995	5Кло5Д	25,2	24
7 / X	,1	ПЛ. 4 ряда. 2,0×1,0 м	1995	10Ясо	12,9	26

* – ПЛ – Плотная; ПР – Продуваемая; А-ПР – Ажурно-продуваемая |

* – ПЛ – Dense; ПР – Ventilated; А-ПР – Openwork-ventilated

Группировка насаждений по состоянию и лесомелиоративному потенциалу

Здоровые насаждения. Группу здоровых насаждений составили в основном монопородные защитные лесные насаждения (80 %), формирующие устойчивые древостой благодаря своевременным рубкам ухода, достигающие наибольшей высоты (особенно насаждения из тополя бальзамического). Хорошие показатели демонстрируют насаждения из клёна остролистного с небольшой примесью (до 3 ед.) дуба черешчатого. Подобные насаждения полностью

отвечают своему назначению по состоянию, конструкции и мелиоративным свойствам (табл. 3).

Средневзвешенная категория санитарного состояния насаждений, отнесённых к категории «здоровые», варьирует от 1,04 до 1,89. Лесоводственно-мелиоративная оценка (5а–4б) демонстрирует, что указанные защитные лесные насаждения имеют оптимальный состав пород для данных лесорастительных условий и отвечают своему назначению по состоянию, конструкции и мелиоративным свойствам.

Удовлетворительные насаждения. К категории «удовлетворительные» отнесены насаждения, у которых от 20 до 70 % деревьев имеют общий зелёный цвет листвы. В кроне может присутствовать до 30 % сухих ветвей, возможны следы повреждения отдельных экземпляров листогрызущими насекомыми и следы поселения на стволах дереворазрушающих грибов, при этом насаждение в целом сохраняет свою структуру, выполняет свои функции, возможны небольшие отклонения от первоначальной конструкции по причине разрастания кроны и вселения под полог иных видов (табл. 4). Группу «удовлетворительных» насаждений составляют главным образом средневозрастные древостои (70 %). Основные ослабляющие факторы, упоминаемые в литературных источниках и отмеченные в ходе исследования, можно разделить на две категории: природно-климатические изменения, усиливающие частоту неблагоприятных погодных явлений [23],

воздействие вредителей и болезней (водянка берёзы, графийоз) и антропогенно обусловленные – несоответствие породного состава локальным условиям, высокая первоначальная густота посадки и отсутствие последующих осветлений и прочисток. В целом насаждения характеризуются слабым или недостаточно хорошим ростом из-за отсутствия ухода, малоустойчивы, их защитные свойства выражены недостаточно. Указанные защитные лесные насаждения могут отвечать своему назначению только после придания им соответствующей конструкции и проведения систематического санитарного и лесоводственного ухода. Средневзвешенная категория санитарного состояния определена в пределах 2,12–2,93, а класс лесоводственно-мелиоративной оценки – 3а–3б.

Таблица 3

Лесные полосы в хорошем состоянии, выполняющих лесомелиоративные функции
в Семилукском (С) и Хохольском (Х) районах Воронежской области

Table 3

Forest belts in good condition, performing forest reclamation functions in Semiluksky (C)
and Khokholsky (X) districts of the Voronezh region

№ ЗЛН / район № FP / District	Возра ст, лет Age, years	Шири на, м Width, m	Площ адь, га Area, ha	Формула породного состава Species composition formula	Запас древесины, м³/га Timber volume, m³/ha	КСС*	ЛМО**
13 X	5	,5	,2	10 Тб	21,007	,45	5б
3 X	0	1,5	,17	7Кло 3Дч	130,59 / 132,59	,04	5а
48 С	0	,0	,25	10 Тб	148,54	,76	4б
50 С	0	,0	,21	10 Тб	24,9	,82	4б
51 С	0	,0	,76	10 Тб	11,04	,91	4б
52а С	0	4,5	,12	10 Бп	38,63	,44	5б
58 С	0	4,5	,2	10 Бп	74,38	,78	4б
1 X	0	1,5	,15	9Кло1Дч	15,78 / 16,58	,52	4а
11 X	0	,5	,2	10Тб	28,466	,88	4б
14 X	0	1,5	,2	10Тб	96,930	,89	4б

* – КСС – категория санитарного состояния; ** – ЛМО – лесомелиоративная оценка |

* – KCC – sanitary condition category; ** – LMO – forest melioration assessment

Таблица 4

Лесные полосы, находящиеся в удовлетворительном состоянии, частично утратившие лесомелиоративные функции и требующие реконструкции в Семилукском (С) и Хохольском (Х) районах Воронежской области

Table 4

Forest belts in satisfactory condition, having partially lost their forest meliorative functions and requiring reconstruction in Semiluksky (C) and Khokholsky (X) districts of the Voronezh region

№ ЗЛН / район № FP / District	Возраст, лет Age, years	Ширина, м Width, m	Площадь, га Area, ha	Формула породного состава Species composition formula	Запас древесины, м³/га Timber volume, m³/ha	КСС*	ЛМО**
9 Х	0	1,5	,15	8Тд2Тб	18,233 / 22,947	,44	3а
10 Х	0	,5	,1	10 Вш	28,199	,56	3б
15 Х	0	,5	,1	10 Тб	62,169	,77	3б
4 Х	0	1,5	,34	5Д5Яо	46,12 / 28,75	,78	3б
49 С	0	,5	,55	10Тб	24,9	,93	3б
52б С	0	4,5	,36	10 Бп	44,14	,86	3б
14 С	0	4,5	,21	6Кло 4Тб (ед. Гр, Яо)	18,7 / 72,854	,31	3а
12 Х	0	1,5	,1	10Тб	32,896	,77	3б
2 Х	0	1,5	,19	7Кло3Дч	166,74 / 86,68	,41	3а
6 Х	0	,5	,1	5Кло5Дч	10,19 / 57,0	,12	3а

* – КСС – категория санитарного состояния; ** – ЛМО – лесомелиоративная оценка |

* – KCC – sanitary condition category; ** – LMO – forest melioration assessment

Ослабленные и погибшие насаждения.
К категории «ослабленные и погибшие» отнесены разрушенные насаждения с массой сухостойных, погибших деревьев (здоровых деревьев менее 20 %), со следами массового поражения вредителями и болезнями, переставшие выполнять мелиоративные функции. В обследованных защитных лесных

насаждениях, произрастающих на участках заложенных пробных площадей, протекают деструктивные процессы – увеличивается задернение почвы, растёт количество сухостоя, древостои в целом имеют ослабленное и сильно ослабленное жизненное состояние, что обусловлено их возрастной структурой, а также уменьшением устойчивости по причине недостатка влаги (табл. 5).

Лесные полосы, требующие переформирования (ослабленные и погибшие)
в Семилукском (С) и Хохольском (Х) районах Воронежской области

Table 5

Forest belts requiring reformation (weakened and dead) in Semiluksky (C)
and Khokholsky (X) districts of the Voronezh region

№ ЗЛН / район № FP / District	Возраст, лет Age, years	Ширина, м Width, m	Площадь, га Area, ha	Формула породного состава Species composition formula	Запас древесины, м³/га Timber volume, m³/ha	КСС*	ЛМО**
0 С	1 3	11, 5	0,1	5Яо5К ло (ед. Лп, Тб)	12,26 / 3,791	4,2 1	1
Х	8 3	11, 5	0,1	5Осо5Т б	40,58 8 / 43,968	3,1 6	2
С	1 2	2,5	0,1	10Тб (ед. Гр)	77,79	3,5 9	2
а С	2 3	6,0	0,6 4	5Тб5Яо (ед. Кло)	85,4 / 6,23 / 2,125	4,8 7	1
С	4 2	13, 0	0,1	7Яс3Кл о (ед.Гр, Дч)	31,42 1 / 15,82	4,0 9	1
С	5 2	9,5	0,1	10Тб (ед.Гр)	75,79 / 1,00	3,1 5	2
С	3 2	13, 0	0,2 1	5Тб5Яс о (ед.Кло)	73,57 3 / 3,998	4,7 4	1
Х	5 3	8,5	0,1	10Тб	140,6 3	3,6 2	2
С	2 2	6,0	0,6 4	5Тб5Яо (ед. Кло)	31,42 1 / 15,82	4,0 9	1
Х	7 3	8,5	0,1	10 Ясо	3,998	4,5 5	1

* – КСС – категория санитарного состояния; ** – ЛМО – лесомелиоративная оценка |

* – КСС – sanitary condition category; ** – ЛМО – forest melioration assessment

Группа ослабленных и погибших насаждений на 50 % состоит из молодняков возрастом 20 лет, имеющих 2-рядную конструкцию, преимущественно продуваемое либо плотное строение, высоту до 23 м, но при этом минимальный средний диаметр – 17,5 см. Породный состав представлен преимущественно недолговечными мягколиственными породами. Кроме того, в 60 % погибших насаждений в качестве одной из ведущих составляющих имелся ясень обыкновенный либо пушистый. Некоторые авторы [24] отмечают массовую гибель ясеней от опасного инвазионного стволового вредителя – ясеневой изумрудной узкотелой златки. Авторами в процессе обследования также зафиксирована практически 100 % гибель ясеневых компонент защитных лесных насаждений. Средневзвешенная категория санитарного состояния определена в пределах

3,15–4,87, а класс лесоводственно-мелиоративной оценки составил 2–1.

Агромелиоративный потенциал и перспективы создания агролесоводственных систем

Анализ результатов полевых исследований демонстрирует возможность агрегации защитных лесных насаждений по имеющемуся агромелиоративному потенциалу в четыре группы, по отношению к перспективности создания агролесоводственных систем различного назначения.

Группа 1. Насаждения, характеризующиеся 5а–4б классом лесоводственно-мелиоративной оценки, в возрасте 20–30 лет, имеющие ажурную, ажурно-продуваемую и продуваемую конструкцию. Состоящие из 3–4 рядов. Монопородные (тополь бальзамический, берёза) либо смешанные (клён

остролистный + дуб черешчатый). Имеющие хорошие показатели жизненного состояния вследствие своевременного проведения комплекса рубок ухода и санитарно-оздоровительных мероприятий (доля деревьев без патологических признаков составляет более 70 %). Защитные лесные насаждения данной группы демонстрируют высокую лесомелиоративную эффективность, высокий потенциал и не требуют проведения оперативных мероприятий.

Группа 2. Насаждения, характеризующиеся 3а, 3б классом лесоводственно-мелиоративной оценки, возрастом 20–40 лет, имеющие плотную конструкцию. Состоящие из 4–5 рядов. Сформированные с участием долгоживущих пород (дуб черешчатый). Имеющие удовлетворительные показатели жизненного состояния. Демонстрирующие слабую сохранность в связи с несвоевременным проведением уходов и санитарно-оздоровительных мероприятий (доля деревьев без патологических признаков составляет от 20 до 70 %). Защитные лесные насаждения данной группы утратили лесомелиоративную эффективность и имеют недостаточно высокий агро-мелиоративный потенциал. В то же время их потенциальная жизнеспособность, долговечность и депонирующие способности делают их хорошей основой для формирования лесоклиматического проекта путём их реконструкции.

Группа 3. Насаждения, характеризующиеся 2, 1 или 0 классом лесоводственно-мелиоративной оценки, возрастом 30–40 и более лет. Любой конструкции, рядности и породного состава. Погибшие или неудовлетворительной сохранности (доля деревьев без патологических признаков составляет менее 20 %). К этой же группе может быть также отнесена древесно-кустарниковая растительность, стихийно расселяющаяся на земли сельскохозяйственного назначения, не используемые для выращивания продукции. Защитные лесные насаждения данной группы окончательно утратили лесомелиоративный потенциал. Нуждаются в полной замене. Представляют собой отличную основу для формирования лесоклиматического проекта при

условии перевода углерода, депонированного в древесном пологе, в почвенный пул [25].

Группа 4. К этой категории могут быть отнесены земли сельскохозяйственного назначения, имеющие крайне низкую потенциальную продуктивность, обусловленную воздействием разнообразных факторов (низкое природное плодородие почвы, обусловленное особенностями природной зональности, регулярное воздействие неблагоприятных погодных явлений, сложный для обработки рельеф, длительное нарушение технологии обработки почвы и прочие). Защитные лесные насаждения данной группы могут изначально создаваться как лесной климатический проект с нулевой базовой линией, что обеспечит максимальный уровень углеродного депонирования за счёт роста древесной биомассы, а также повысит уровень секвестрации за счёт ликвидации выброса парниковых газов в процессе низкопродуктивного сельскохозяйственного производства.

Обсуждение

Проведённые исследования позволили выявить широкий спектр факторов, определяющих современное состояние полезащитных лесных насаждений в Центральной лесостепи Европейской части России. Полученные результаты подтверждают, что количественные лесоводственные параметры (состав, полнота, конструкция) и качественные характеристики (санитарное состояние, долговечность пород) находятся в тесной взаимосвязи и в совокупности определяют лесомелиоративный потенциал агролесоводческих систем [2, 7].

Установлено, что наиболее устойчивыми и продуктивными являются насаждения с участием дуба черешчатого (до 90 % встречаемости в Каменной Степи), что согласуется с выводами В.И. Михина и соавторов [7] о доминирующей роли дуба как эдификатора в лесостепных агроландшафтах. Высокая продуктивность смешанных дубово-березовых полос (например, № 250 с запасом 836,63 м³/га) свидетельствует о целесообразности использования биологического потенциала мягколиственных пород в сочетании с долговечными породами на ранних этапах роста. В то же время монопородные тополевые насаждения,

несмотря на быстрый рост (высота до 27,4 м в возрасте 20–30 лет), характеризуются снижением устойчивости после 30 лет, что соответствует данным о динамике продуктивности быстрорастущих пород в засушливых условиях [6].

Конструкция лесных полос также оказала существенное влияние на их сохранность. Преобладание продуваемых конструкций (66,6 %) в Семилукском и Хохольском районах объясняется их оптимальностью для равномерного снегораспределения и снижения скорости ветра без иссушения почвы [3]. Однако насаждения плотной конструкции, закладывавшиеся в 1950–1960-е годы (например, № 133а, 133б, 135а), при отсутствии своевременных рубок ухода трансформировались в загущенные древостои с высокой конкурентной напряжённостью, что привело к образованию сухостоя и снижению мелиоративного эффекта. Это подтверждает тезис о необходимости регулярного ухода за защитными насаждениями, отмеченный в работах В.В. Танюкевича и соавторов [8].

Категория санитарного состояния, согласно А.А. Молчанову [23], напрямую коррелирует с продуктивностью. В наших исследованиях установлено, что насаждения с КСС 1,0–1,5 имеют запас древесины на 40–60 % выше, чем ослабленные (КСС > 2,5). Особенно критическое положение сложилось с ясеневыми насаждениями: во всех обследованных полосах, где ясень входил в состав (70 % в Каменной Степи, 60 % в группе погибших насаждений), отмечена массовая гибель от ясеневой узкотелой изумрудной златки (*Agrilus planipennis*), что согласуется с данными А.Н. Володченко [24] о стремительном распространении этого инвазивного вредителя в Центральной лесостепи.

Вяз также продемонстрировал высокую степень ослабления (КСС 2–3), что связано с поражением голландской болезнью, отмечаемым в регионе на протяжении последних десятилетий. Напротив, клён остролистный показал устойчивость (КСС 1–2), что делает его перспективной породой для реконструкции защитных насаждений в условиях возрастающей антропогенной нагрузки и климатических изменений [5].

Анализ архивных данных по Каменно-Степному комплексу показал, что насаждения,

созданные в конце XIX – первой половине XX века (полосы № 28, 34, 117, 118), сохранили высокую продуктивность (до 596,82 м³/га) благодаря изначально заложенному оптимальному породному составу и регулярным уходам. Это подтверждает эффективность принципов В.В. Докучаева и Г.Ф. Морозова, заложенных при создании первых государственных лесополос [3]. Однако насаждения более позднего периода (1950–1980-е годы), создававшиеся с нарушением агротехники или без учёта последующего ухода, демонстрируют признаки деградации, что требует их реконструкции.

Выделенные четыре группы насаждений по агромелиоративному потенциалу открывают возможности для реализации климатических проектов. Группа 2 (удовлетворительные насаждения с участием долгоживущих пород) может служить основой для реконструкции с целью повышения углерододепонирующей способности. Согласно оценкам, проведённым С.С. Морковиной и соавторами [12, 25], даже частичная реконструкция таких насаждений способна увеличить секвестрационный потенциал лесостепных агроландшафтов на 28–30 % к 2030 году.

Группа 3 (погибшие насаждения) представляет собой готовый объект для полной замены с возможностью перевода депонированного углерода в почвенный пул, что уже реализовано в рамках климатического проекта «Зелёный щит» в Волгоградской области [14]. Группа 4 (малопродуктивные сельхозземли) позволяет создавать новые защитные насаждения с нулевой базовой линией, что даёт максимальный прирост углеродного кредита и одновременно способствует восстановлению экологического баланса [5, 6].

Полученные данные согласуются с международными исследованиями, в которых подчёркивается высокая экосистемная ценность агролесоводства для сохранения биоразнообразия, регуляции водного баланса и повышения экономической устойчивости сельских территорий [1, 4, 5]. В странах Восточной Европы, в частности в Украине, аналогичные проблемы деградации полезащитных полос решаются через механизмы софинансирования и доступа к углеродным рынкам

[5]. Российский опыт реализации климатических проектов (82 зарегистрированных проекта на 2025 г.) показывает, что вовлечение агролесомелиоративных систем в углеродное кредитование может стать драйвером восстановления защитных насаждений [13, 14].

Заключение

1. В результате комплексного обследования 46 полезащитных лесных полос, расположенных на чернозёмных почвах Центральной лесостепи Европейской части РФ (Каменная Степь, Семилукский и Хохольский районы Воронежской области), установлено, что исследуемые насаждения находятся в возрастном диапазоне от 20 до 126 лет и различаются по породному составу, конструкции, санитарному состоянию и продуктивности.
2. Наиболее продуктивными являются насаждения с участием дуба черешчатого: лесная полоса № 250 (6Д4Б) имеет запас древесины 836,63 м³/га, полоса № 1336 (10Д с примесью ясеня и клёна) – 596,82 м³/га, полоса № 252 – 542,97 м³/га. Высокую продуктивность в возрасте 20–30 лет демонстрируют монопородные тополевые и берёзовые лесополосы ажурно-продуваемой конструкции, достигая высоты до 27,4 м и формируя защитный эффект в кратчайшие сроки.
3. Установлено, что дуб черешчатый присутствует в 90 % обследованных полос, сохраняя преимущественно 1–2 категории санитарного состояния (здоровые и слабо ослабленные деревья). Клён остролистный также характеризуется высокой устойчивостью. В то же время зафиксирована практически 100 % гибель ясеня обыкновенного и ясеня пенсильванского вследствие поражения изумрудной узкотелой златкой (*Agrilus planipennis*), что делает эти породы непригодными для дальнейшего использования в защитном лесоразведении.
4. На основе лесоводственно-мелиоративной оценки по шкале Е.С. Павловского и категорий санитарного состояния все обследованные насаждения дифференцированы на четыре

группы по уровню агролесомелиоративного потенциала.

- Первая группа (класс ЛМО 5а–4б, КСС 1,04–1,89) объединяет насаждения с высокой лесомелиоративной эффективностью – монопородные тополевые и берёзовые лесополосы, а также смешанные насаждения клёна остролистного с дубом черешчатым в возрасте 20–30 лет. Доля здоровых деревьев в них превышает 70 %, они не требуют оперативных вмешательств.
- Вторая группа (класс ЛМО 3а–3б, КСС 2,12–2,93) включает средневозрастные древостои (20–40 лет) с плотной конструкцией, сформированные с участием долгоживущих пород, но без своевременных рубок ухода. Доля здоровых деревьев составляет от 20 до 70 %. Такие насаждения утратили часть мелиоративных функций, но сохраняют жизнеспособность и могут быть восстановлены путём реконструкции.
- Третья группа (класс ЛМО 2–0, КСС 3,15–4,87) представлена насаждениями, утратившими лесомелиоративный потенциал: доля здоровых деревьев менее 20 %. В 60 % случаев в составе этих насаждений присутствовал ясень. Они подлежат полной замене.
- Четвёртая группа – низкопродуктивные земли сельскохозяйственного назначения, потенциально пригодные для создания защитных насаждений в рамках лесоклиматических проектов с нулевой базовой линией.

Таким образом, лесомелиоративный потенциал полезащитных насаждений Центральной лесостепи определяется комплексом факторов: породным составом, возрастом, конструкцией и своевременностью лесоводственных уходов. Дифференцированный подход к каждой из выделенных групп позволяет оптимизировать мероприятия по сохранению, реконструкции и новому лесоразведению, а также интегрировать защитные лесные насаждения в региональные стратегии устойчивого развития и климатические проекты.

Список литературы

1. Garnett S.T., Burgess N.D., Fa J.E., Fernández-Llamazares Á., Molnár Z., Robinson C.J., Watson J.E.M. et al. A spatial overview of the global importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*. – 2018. – Vol. 1 (7). – P. 369–374. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0100-6>.
2. Ларина Н.В., Черных Н.П. Агролесоводство и защитные полосы: роль в системе устойчивого сельского хозяйства. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. – 2024. – Т. 11. – № 2 (98). – С. 97–99. – DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-11-2-97-99>.
3. Защитные государственные лесополосы. – URL: <https://ussrnaturetransformation.tilda.ws/lesoposadki> (дата обращения: 01.06.2025).
4. Le T.H., Bonari G., Sauerwein M. et al. Traditional agroforestry systems in Europe revisited: a systematic review. *Agroforestry Systems*. – 2025. – Vol. 99. – P. 236. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01335-0>.
5. Pimenow S., Pimenowa O., Moldavan L., Prus P., Sadowska K. Agroforestry as a Resource for Resilience in the Technological Era: The Case of Ukraine. *Resources*. – 2025. – Vol. 14 (10). – P. 152. – DOI: <https://doi.org/10.3390/resources14100152>.
6. Korneeva E.A., Belyaev A.I. Assessment of Ecological and Economic Efficiency of Agroforestry Systems in Arid Conditions of the Lower Volga. *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – P. 1248. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081248>.
7. Михин В.И., Михина Е.А., Михина В.В. Роль полезащитных насаждений в преобразовании ландшафтов Центрального Черноземья. *Лесотехнический журнал*. – 2015. – Т. 5. – № 4 (20). – С. 43–50. – DOI: <https://doi.org/10.12737/17401>.
8. Танюкевич В.В., Рулев А.С., Бородычев В.В., Тюрин С.В., Хмелева Д.В., Кваша А.А. Продуктивность и природоохранная роль полезащитных лесонасаждений *Robinia pseudoacacia* L. Прикубанской равнины. *Известия вузов. Лесной журнал*. – 2020. – № 6. – С. 88–97.
9. Турусов В.И., Лепехин А.А., Чеканышкин А.С. Опыт лесной мелиорации степных ландшафтов. – Воронеж: Истоки, 2017. – 228 с.
10. Проездов П.Н., Маштаков Д.А. Агролесомелиорация. – Саратов: Амирит, 2016. – 472 с.
11. Левина И.В. Особенности воспроизводства и эффективность использования земельных ресурсов. *Вестник сельского развития и социальной политики*. – 2018. – № 3 (19). – С. 42–45.
12. Морковина С.С., Моисеев П.С., Писарев А.Е. Экономические аспекты агrolесоводства. *Лесотехнический журнал*. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 247–262. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/15>
13. TASS. Russia's first forest-climate project begins in Yamal. 2025. – URL: <https://tass.com/economy/2032805> (дата обращения: 15.03.2026).
14. VSUFT. VSUFT registered a new climate project “Green Shield” for the Volgograd Thermal Power Plant. 2025. – URL: <https://vgltu.ru/en/life-of-the-university/news/vgltu-zaregistroval-novyy-klimaticheskij-proekt-zelenyj-wit-dlya-volgogradskoj-tec/> (дата обращения: 15.03.2026).
15. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии. Нормативы и элементы географии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 763 с.
16. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). – М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, ИАА, 2008. – 886 с.
17. Рулев А.С., Рулева О.В., Сучков Д.К. Почвенно-таксационная оценка модульных полезащитных лесных полос. *Лесохозяйственная информация*. – 2021. – № 1. – С. 83–92. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LNI.2304-3083.2021.1.07>.
18. Сухановский Ю.П., Олешицкий В.В. Способ определения оптической плотности ветрозащитного барьера и ажурности лесных полос. Патент РФ № 2285389, МПК А01G 23/00. Заявл. 07.09.2004, опубл. 20.10.2006.
19. Правила содержания и сохранения агrolесомелиоративных насаждений и (или) агрофитомелиоративных насаждений. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 26.04.2024 № 225. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306062998> (дата обращения: 09.06.2025).
20. Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г., Сауткина М.Ю. Влияние приемов мелиорации на рост древесных пород. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*. – 2017. – Т. 21. – № 6. – С. 13–19.
21. Павловский Е.С. Устройство агrolесомелиоративных насаждений. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 126 с.
22. Правила санитарной безопасности в лесах. Постановление Правительства РФ от 09.12.2020 № 2047. – URL: <https://base.garant.ru/75037636/> (дата обращения: 09.06.2025).
23. Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах разных зон. – М.: Наука, 1976. – 102 с.
24. Володченко А.Н. Расширение ареала ясеневой узкотелой златки (*Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888) на юго-востоке европейской части России. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2025. – № 1 (254). – С. 112–124. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.254.112-124>.

25. Morkovina S.S., Yakovenko N.V., Kolesnichenko E.A., Panyavina E.A., Sheshnitsan S.S., Pryadilina N.K., Topcheev A.N. Integration of forest-climatic projects into regional sustainable development strategies: Russian experience of central forest-steppe. *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17 (17). – P. 7877. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su17177877>.

References

1. Garnett S.T., Burgess N.D., Fa J.E., Fernández-Llamazares Á., Molnár Z., Robinson C.J., Watson J.E.M. et al. A spatial overview of the global importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*. 2018; 1 (7): 369–374. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0100-6>.
2. Larina N.V., Chernykh N.P. Agrolesovodstvo i zashchitnye polosy: rol' v sisteme ustoychivogo sel'skogo khozyaystva. [Agroforestry and shelterbelts: their role in sustainable agriculture]. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024; 11 (2/98): 97–99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-11-2-97-99>.
3. Zashchitnye gosudarstvennye lesopoloosy [Protective state forest belts]. (In Russ.). URL: <https://ussrnaturetransformation.tilda.ws/lesoposadki> (accessed 01.06.2025).
4. Le T.H., Bonari G., Sauerwein M. et al. Traditional agroforestry systems in Europe revisited: a systematic review. *Agroforestry Systems*. 2025; 99: 236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01335-0>.
5. Pimenow S., Pimenowa O., Moldavan L., Prus P., Sadowska K. Agroforestry as a Resource for Resilience in the Technological Era: The Case of Ukraine. *Resources*. 2025; 14 (10): 152. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources14100152>.
6. Korneeva E.A., Belyaev A.I. Assessment of Ecological and Economic Efficiency of Agroforestry Systems in Arid Conditions of the Lower Volga. *Forests*. 2022; 13: 1248. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081248>.
7. Mikhin V.I., Mikhina E.A., Mikhina V.V. Rol' polezashchitnykh nasazhdeniy v preobrazovanii landshtaftov Tsentral'nogo Chernozem'ya. [The role of shelterbelts in the transformation of landscapes of the Central Chernozem Region]. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2015; 5 (4/20): 43–50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/17401>.
8. Tanyukevich V.V., Rulev A.S., Borodychev V.V., Tyurin S.V., Khmeleva D.V., Kvasha A.A. Produktivnost' i prirodookhrannaya rol' polezashchitnykh lesonasazhdeniy Robinia pseudoacacia L. Prikubanskoy ravniny. [Productivity and nature conservation role of Robinia pseudoacacia L. shelterbelt plantations in the Kuban Plain]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = News of universities. Forestry journal*. 2020; 6: 88–97. (In Russ.).
9. Turusov V.I., Lepekhin A.A., Chekanyshkin A.S. Opyt lesnoy melioratsii stepnykh landshtaftov [Experience of forest melioration of steppe landscapes]. Voronezh: Istoki; 2017. 228 p. (In Russ.).
10. Proezdov P.N., Mashtakov D.A. Agrolesomelioratsiya [Agroforestry]. Saratov: Amirit; 2016. 472 p. (In Russ.).
11. Levina I.V. Osobennosti vosproizvodstva i effektivnost' ispol'zovaniya zemel'nykh resursov [Features of reproduction and efficiency of land resource use]. *Vestnik sel'skogo razvitiya i sotsial'noy politiki = Bulletin of rural development and social policy*. 2018; 3 (19): 42–45. (In Russ.).
12. Morkovina S.S., Moiseev P.S., Pisarev A.E. Ekonomicheskie aspekty agrolesovodstva [Economic Aspects of Agroforestry]. *Lesotekhnicheskiiy zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2025; 15 (2/58): 247–262. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/15>.
13. TASS. Russia's first forest-climate project begins in Yamal. 2025. URL: <https://tass.com/economy/2032805> (accessed 15.03.2026).
14. VSUFT. VSUFT registered a new climate project “Green Shield” for the Volgograd Thermal Power Plant. 2025. URL: <https://vgltu.ru/en/life-of-the-university/news/vgltu-zaregistroval-novyj-klimaticheskij-proekt-zelenyj-wit-dlya-volgogradskoj-tec/> (accessed 15.03.2026).
15. Usol'tsev V.A. Fitomassa lesov Severnoy Evrazii. Normativy i elementy geografii [Forest biomass in Northern Eurasia. Standards and elements of geography]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2002. 763 p. (In Russ.).
16. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Buluy Yu. Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdeniy osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoy Evrazii (normativno-spravochnye materialy) [Tables and models of growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (regulatory and reference materials)]. Moscow: Federal Forestry Agency, IIASA; 2008. 886 p. (In Russ.).
17. Rulev A.S., Ruleva O.V., Suchkov D.K. Pochvenno-taksatsionnaya otsenka modul'nykh polezashchitnykh lesnykh polos [Soil-taxation assessment of modular forest shelterbelts]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya = Forestry information*. 2021; 1: 83–92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.07>.
18. Sukhanovskiy Yu.P., Oleshitskiy V.V. Sposob opredeleniya opticheskoy plotnosti vetrozashchitnogo bar'yera i azhurnosti lesnykh polos [Method for Determining the Optical Density of a Windbreak Barrier and the Openness of Forest Belts]. Patent RF No. 2285389, IPC A01G 23/00. Filed 07.09.2004, published 20.10.2006. (In Russ.).

19. Pravila soderzhaniya i sokhraneniya agrolesomeliorativnykh nasazhdeniy i (ili) agrophytomeliorativnykh nasazhdeniy [Rules for the Maintenance and Preservation of Agroforestry and (or) Agrophyto-Meliorative Plantations]. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated 26.04.2024 No. 225. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306062998> (accessed 09.06.2025).
20. Cheverdin Yu.I., Vavin V.S., Akhtyamov A.G., Sautkina M.Yu. Vliyaniye priemov melioratsii na rost drevesnykh porod [The influence of land reclamation techniques on the growth of tree species]. *Lesnoy vestnik = Forestry bulletin*. 2017; 21 (6): 13–19. (In Russ.).
21. Pavlovskiy E.S. Ustroystvo agrolesomeliorativnykh nasazhdeniy [The device of agroforestry plantations]. Moscow: Lesnaya Promyshlennost; 1973. 126 p. (In Russ.).
22. Pravila sanitarnoy bezopasnosti v lesakh [Rules for sanitary safety in forests]. Resolution of the Government of the Russian Federation of 09.12.2020 No. 2047. (In Russ.). URL: <https://base.garant.ru/75037636/> (accessed 09.06.2025).
23. Molchanov A.A. Produktivnost' organicheskoy massy v lesakh raznykh zon [Productivity of Organic Mass in Forests of Different Zones]. Moscow: Nauka; 1976. 102 p. (In Russ.).
24. Volodchenko A.N. Rasshirenie areala yasenovoy uzkotelay zlatki (*Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888) na yugovostoke evropeyskoy chasti Rossii [Expansion of the range of the ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888) in the southeast of the European part of Russia]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2025; 1 (254): 112–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2025.254.112-124>.
25. Morkovina S.S., Yakovenko N.V., Kolesnichenko E.A., Panyavina E.A., Sheshnitsan S.S., Pryadilina N.K., Topcheev A.N. Integration of forest-climatic projects into regional sustainable development strategies: Russian experience of central forest-steppe. *Sustainability*. 2025; 17 (17): 7877. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17177877>.

Сведения об авторах

Харченко Николай Николаевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>, e-mail: hnn-vrn@yandex.ru.

Цепляев Алексей Николаевич – доктор с.-х. наук, профессор, кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1938-5660>, e-mail: vsealexey@mail.ru.

Колесниченко Елена Александровна – доктор экономических наук, профессор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р.Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, 392622, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-7625>, e-mail: ekolesnichenko@live.ru.

Рыбалкина Наталья Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Воронежский ФАНЦ им. В.В. Докучаева», Воронежская область, Таловский район, п. 2 участка Института им. Докучаева, квартал 5, дом 81, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8514-9047>, e-mail: rybnv@mail.ru.

Тунякин Владимир Дмитриевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела «Каменно-Степное опытное лесничество» ФГБНУ «Воронежский ФАНЦ им. В.В. Докучаева», Воронежская область, Таловский район, п. 2 участка Института им. Докучаева, квартал 5, дом 81, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6766-8318>, e-mail: ksolnauka@mail.ru.

Information about the authors

Nikolay N. Kharchenko – Dr. Sci. (Bio.), Professor, Head of the Department of Ecology, Forest Protection and Forest Hunting, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>, e-mail: hnn-vrn@yandex.ru.

Alexey N. Tseplyev – Dr. Sci. (Agric.), Prof. department of botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>, e-mail: vsealexey@mail.ru.

Elena A. Kolesnichenko – Dr. sci. (econom), Professor, Tambov state university named after G.R.Derzavin, 33 Internatsionalnaya str., Tambov, 392622, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-7625>, ekolesnichenko@live.ru.

Natalia V. Rybalkina – Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Voronezh Federal Research Center named after V.V. Dokuchaev”, Stone Steppe, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8514-9047>, e-mail: rybnv@mail.ru.

Vladimir D. Tunyakin – Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher of the Department “Stone-Steppe Experimental Forestry” of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Voronezh Federal Research Center named after V.V. Dokuchaev, Stone Steppe, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6766-8318>, e-mail: ksolnauka@mail.ru.

Приложение

Таблица 1

Таблица – Расшифровка аббревиатур древесных пород, конструкций лесных полос и оценочных показателей
Table 1

Decoding of abbreviations for tree species, forest belt designs, and assessment indicators

Аббревиатура/Abbreviation	Название на русском/ Russian name /	Название на латинице / Latin name
Древесные породы/ Tree species		
Б	Берёза пушистая	<i>Betula pubescens</i> Ehrh.
Д	Дуб черешчатый	<i>Quercus robur</i> L.
Дкр	Дуб красный	<i>Quercus rubra</i> L.
Яо	Ясень обыкновенный	<i>Fraxinus excelsior</i> L.
Яп	Ясень пушистый	<i>Fraxinus pubescens</i> Lam.
Ясо	Ясень ланцетный (зелёный)	<i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh.
Ко	Клён остролистный	<i>Acer platanoides</i> L.
Кло	Клён остролистный	<i>Acer platanoides</i> L.
Кяс	Клён ясенелистный	<i>Acer negundo</i> L.
Кяв	Клён татарский	<i>Acer tataricum</i> L.
Кт	Клён татарский	<i>Acer tataricum</i> L.
Т	Тополь	<i>Populus</i> sp.
Тб	Тополь бальзамический	<i>Populus balsamifera</i> L.
Тд	Тополь дрожащий (осина)	<i>Populus tremula</i> L.
Ос	Осина	<i>Populus tremula</i> L.
Осо	Осина	<i>Populus tremula</i> L.
В	Вяз	<i>Ulmus</i> sp.
Вш	Вяз шершавый	<i>Ulmus glabra</i> Huds.
Вм	Вяз мелколистный	<i>Ulmus minor</i> Mill.
Во	Вяз обыкновенный	<i>Ulmus laevis</i> Pall.
Лп	Липа мелколистная	<i>Tilia cordata</i> Mill.
Лс	Лиственница сибирская	<i>Larix sibirica</i> Ledeb.
Ряб	Рябина обыкновенная	<i>Sorbus aucuparia</i> L.
Гр	Груша лесная	<i>Pyrus pyraeaster</i> (L.) Burgsd.
Аб	Акация белая	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.
Аж	Акация жёлтая	<i>Caragana arborescens</i> Lam.
Ябл	Яблоня лесная	<i>Malus sylvestris</i> Mill.
Жимолость	Жимолость обыкновенная	<i>Lonicera xylosteum</i> L.
Бересклет	Бересклет европейский	<i>Euonymus europaeus</i> L.
Лещина	Лещина обыкновенная	<i>Corylus avellana</i> L.
Птелея	Вязовик (птелея трёхлистная)	<i>Ptelea trifoliata</i> L.
Конструкции лесных полос/ Forest belt designs		
Пл	Плотная	Dense
Пр	Продуваемая	Ventilated
А-Пр	Ажурно-продуваемая	Openwork-ventilated
Показатели/ Indicators		
КСС	Категория санитарного состояния	Sanitary condition category
ЛМО	Лесоводственно-мелиоративная оценка	Forest reclamation assessment
Дополнительные обозначения/ Additional notations		
ед.	Единично (менее 1 % в составе)	Singly (less than 1%)
гнезда	Гнёздовая посадка	Nest planting

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2026 Том 16 № 1 (61)

Подписано в печать 24.03.2026. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет 30.03.2026. Цена 1 922 р.

Усл. печ. л. 35,5. Уч.-изд. л. 65,9. Тираж 1000 экз. Заказ 741

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

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

Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»
394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

Scientific journal

2026 Vol. 16 № 1 (61)

Signed to be published 24.03.2026. Format 60×90 1/8.

Publication date 30.03.2026. Price 1 922 rub.

Cond. print. sh. 35,5. Acc.-print. sh. 65,9. Printing 1000 copies. Order 741

Publisher: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov» (FSBEI HE «VSUFT»)

Publisher address: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry
and Technologies named after G.F. Morozov»

Timiryazev str., 8, Voronezh 394087

phone (473) 253-72-90, fax (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Department of Operational Printing of the FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaev str., 10, Voronezh 394087