

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2025 Том 15 № 2 (58)

- Morphological variations among families of Manna Ash (*FRAXINUS ORNUS L.*)
- Опыт первичной акклиматизации посадочного материала *in vitro* *Betula pendula* var. *Dalecarlica* в условиях г. Архангельска
- Материальная оценка стволов сосны (*Pinus sylvestris L.*) Костромской области



ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2025 Том 15 № 2 (58)

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., чл.-корр. РАН А.А. Сирин (Россия)
2012-2023

д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)

д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)

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

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

д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)

д.б.н., проф. А.А. Гусев (Россия)

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

д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)

д-р наук И. Ремеш (Чехия)

д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)

д.т.н., проф. В.А. Зеликов (Россия)

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

д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)

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

д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)

д.т.н., проф. В.С. Сяонёв (Россия)

д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)

д-р наук, ст. науч. сотрудник

Клессия 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. Билиц (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

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

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2025

FORESTRY ENGINEERING

JOURNAL

Scientific journal

2025 Vol. 15 № 2 (58)

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. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023

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

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

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

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

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

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

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. S.V. Rabko (Belarus)

Prof. Zhou Dingguo (PRC)

Dr., prof. A. Marcomini (Italy)

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

Dr., Prof. N. Bilir (Turkey)

Dr., Prof. J. 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

EPD 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», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Bilir N. Morphological variations among families of manna ash (<i>FRAXINUS ORNUS</i> L.)	6
Грязькин А.В., Горбач В.В., Феклистов П.А., Климов Б.Б., Гаврилова О.И. Закономерности процесса формирова- ния мутовок в куртинах подроста сосны обыкновенной в сосняке брусничном на юге Республики Бурятия	15
Карташова Н.П. Запасы фитомассы подлесочных пород и их прирост в лесостепных экосисте- мах Окско-Донской равнины	29
Крайнова А.А., Антонов А.М., Лебедева О.П. Опыт первичной акклиматизации поса- дочного материала <i>in vitro Betula</i> <i>pendula</i> var. <i>Dalecarlica</i> в условиях г. Архангельска	47
Лавренов М.А., Котов А.А., Брынцев В.А., Рысин С.Л., Коженкова А.А. Фенологические исследования различ- ных видов лиственниц, произрастаю- щих на территории ГБС РАН	64
Новосёлов А.С., Попов О.С. Влияние гидротехнической мелиора- ции и особенностей развития ассими- ляционных аппаратов деревьев сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L.) на выделение ими терпентина	88

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

Bilir N. Morphological variations among families of manna ash (<i>FRAXINUS</i> <i>ORNUS</i> L.)	6
Gryazkin A.V., Gorbach V.V., Feklistov P.A., Klimov B.B., Gavrilova O.I. Patterns of the process of whorl formation in the curtains of the under- growth of the common <i>Pine</i> in the cowberry pine forest in the south of the Republic of Buryatia	15
Kartashova N.P. Reserves of phytomass of understory rocks and their growth in forest-steppe ecosystems of the Oka-Don plain	29
Krainova A. A., Antonov A.M., Lebedeva O.P. Experience of primary acclimatization of planting material <i>in vitro Betula</i> <i>pendula</i> var. <i>Dalecarlica</i> in the conditions of Arkhangelsk	47
Lavrenov M.A., Kotov A.A., Bryntsev V.A., Rysin S.L., Kozhenkova A.A. Phenological studies of various types of larches growing on the territory of the main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences	64
Novoselov A.S., Popov O.S. The impact of hydroengineering recla- mation and the development character- istics of the assimilation apparatus of Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) on its turpentine emission	88

Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Богданов А.П., Цветков И.В.
Стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России 107

Серебряков О.В., Турчанинова Е.В., Харченко Н.Н.
Влияние климатических факторов на развитие заболеваний дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на примере мучнистой росы 122

Федорова О.А., Евтушенко Н.А., Евлаков П.М., Захарова О.В., Гусев А.А.
Использование нанопрепаратов оксида меди в качестве стерилизующих агентов на этапе введения древесных культур в культуру *in vitro* 142

ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Вахнина Т.Н., Федотов А.А., Сусоева И.В.
Структурообразование при низкотемпературном режиме прессования фанеры ФСФ 158

ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Головина Е.В., Павлов А.И.
Нейросетевой блок ПИД-регулятора корректировки настройки параметров гидроагрегата лесной машины 174

Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Bogdanov A.P., Tsvetkov I.V.
Standard tables of sums of areas of sections and reserves of normal willow trees in the taiga zone of the European North of Russia 107

Serebryakov O.V., Turchaninova E.V., Kharchenko N.N.
Influence of climatic factors on the development of diseases of oak petiole (*Quercus robur* L.) on the example of powdery mildew 122

Fedorova O.A., Evtushenko N.A., Evlakov P.M., Zakharova O.V., Gusev A.A.
Use of copper oxide nanopreparations as sterilizing agents at the stage of introducing woody crops into *in vitro* culture 142

WOOD PROCESSING. CHEMICAL TECHNOLOGIES

Vakhnina T.N., Fedotov A.A., Susoeva I.V.
Structure formation in the low-temperature mode of pressing FSF plywood on phenol-formaldehyde binder 158

TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT

Golovina E.V., Pavlov A.I.
Neural network block of PID controller for adjusting the settings of forest machine hydraulic unit parameters 174

Драпалюк М.В., Платонов А.А., Попиков П.И. Моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора манипулятора лесных машин	191
Малюков С.В., Лысыч М.Н., Бухтояров Л.Д., Шавков М.В., Петков А.Ф., Попов М.А., Черенков Д.С. Полевые исследования модульных рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего орудия	207

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В., Гостева Д.Ю. Материальная оценка стволов сосны (<i>Pinus sylvestris</i> L.) Костромской области	224
Морковина С.С., Моисеев П.С., Писарев А.Е. Экономические аспекты агролесоводства	247
Шанин И.И., Штондин А.А., Кузнецова Е.В. Сравнительная характеристика используемого лесопосадочного материала при лесовосстановлении	263

Drapalyuk M.V., Platonov A.A., Popikov P.I. Modelling of the working process of the hydraulic pulsator of forest machine manipulator	191
Malyukov S.V., Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Shavkov M.V., Petkov A.F., Popov M.A., Cherenkov D.S. Field studies of modular working bodies of combined tillage tool	207

NATURE MANAGEMENT

Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V., Gosteva D.Yu. Material assessment of Pine trunks (<i>Pinus sylvestris</i> L.) in Kostroma region	224
Morkovina S.S., Moiseev P.S., Pisarev A.E. Economic aspects of agroforestry	247
Shanin I.I., Shtondin A.A., Kuznetsova E.V. Comparative characteristics of forest planting material used in reforestation	263



Morphological variations among families of Manna Ash (*FRAXINUS ORNUS* L.)

Nebi Bilir✉, nebibilir@isparta.edu.tr,  <https://orcid.org/0000-0001-9911-4304>

Forestry Faculty, Isparta University of Applied Sciences, TR-32260, Isparta, Türkiye

Abstract

Variations, narrow-sense heritability, and correlations for height and diameter at base were examined in a 15- years progeny trial established by 30 open pollinated families of Manna ash (*Fraxinus ornus* L. subsp. *cilicica*) to contribute genetics-breeding practices of the species. Averages of tree height and diameter at base of the family were 318.5 cm and 62.5 mm in the families, while there were large differences among trees within family for the characteristics. Averages of families ranged from 285.6 cm to 359.2 cm for tree height, and between 55.3 mm and 70.5 mm for diameter at base. They changed between 180 cm and 462 cm for tree height, and between 36.6 mm and 95.9 mm for diameter at individual trees of total families. The families showed significant ($p \leq 0.05$) difference for the tree height opposite to diameter at base according to results of analysis of variance. Variation among trees within family was higher than among families for the characters. The heritability was 0.21 for tree height and 0.06 for diameter at base. Thus, non-genetic factors seem often more important for the variation in performance of trees than their genetic structure, and forestry practices on Manna ash. Positive and significant ($p \leq 0.05$) phenotypic and genetic relations between tree height and diameter at base were found based on correlation analysis. Results of the study were discussed based on genetic-breeding and other forestry and cultivation practices of the species.

Keywords: *correlation, diameter, growth, height, heritability, variation*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Bilir N. (2025) Morphological variations among families of manna ash (*FRAXINUS ORNUS* L.). Forest Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 6-14. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/1>.

Received 03.03.2025. **Revised** 13.04.2025. **Accepted** 05.06.2025. **Published online** 26.06.2025.

Introduction

According to the latest forestry inventory [1], Ash taxa (*Fraxinus* sp.) has about 12074 ha at 23.4 million ha of total Turkish forest area by three species (*Fraxinus excelsior*, *F. ornus* and *F. angustifolia*) [2]. However, most of them is unproductive distribution. Until recently, Common ash (*Fraxinus excelsior* L.) and Narrow-leaved ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) have

been planted mainly with production objectives. Both species (but particularly common ash) have been widely planted for timber, and there has been some work on genetic improvement for common ash, based on selection for traits considered superior in a timber tree [3]. The Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) has the most limited distribution of three Turkish and European ashes. Manna ash occurs mainly in southern Europe and its main dis-

tribution range is in Italy (mostly in the south and Mediterranean Islands), Greece, and in east regions of the Balkan Peninsula and Turkey as local population, groups or a maque element as to be a dominant or co-dominant species in most of its habitats by two subspecies (*Fraxinus ornus* subsp. *cilicica* and *F.o.* subsp. *ornus*) [3]. Silvicultural management showed *Fraxinus ornus* forest takes three different forms: high forests (of seed origin), coppices and mixed shrubs. The trees are frequently multitemmed or shrubby owing to coppicing, grazing or re-sprouting after wildfires [3]. While Common ash (*Fraxinus excelsior*) and Narrow leaved ash (*F. angustifolia*) occupy in humid area, Manna ash occupy in arid zones of Mediterranean region in Turkey [4]. Manna ash grows from sea level up to 1500 m altitude at optimum rainfall is from 500 to 650 mm, and low temperatures limit the distribution of Manna ash in central Europe [3]. It is a small deciduous tree, usually not more than 15 m tall [3]. However, wood of manna ash is an important material for such as furniture, ornamental, charcoal and equipments of music industries. Besides, oil is extracted from its bark used in medicinal purposes [2]. In addition to the species is very resistance to aridity, forest fire [5], and climate change [6]. Manna ash could be also an adaptive species to climate change. Its forests on carbonate soils possess rich species diversity. At present the main silvicultural significance of *F. ornus* in southern and central Europe is in the reforestation or afforestation of eroded and degraded soils in karst regions and other degraded ecosystems around the Mediterranean Basin. On such sites it covers the soil very quickly, and ameliorates poor soils with its annual litter-fall. It also provides good microclimatic conditions for the growth and regeneration of other tree species. It grows rapidly when young (in contrast to the oaks which grow with it), but only to a height of 8-15 m. *Fraxinus ornus* is the source of manna, an oxidised dried exudate from the bark of young trees which was formerly used as a laxative [3]. These advantages of the species are getting importance for increasing of limited distribution by plantation forestry, and also genetic-breeding studies. Estimation of morphological variation and gentic parameters are most important tools in genetic-breeding strategies and other forestry practices. It is clear that quality and quantity of forest product such as wood could be increased by intensive silviculture and

genetic-improvement studies (i.e., progeny test, estimations of genetic parameters) togetherwith solution of environmental problems such as global warming by resistance breeding. However, limited genetic studies were carried out on Manna ash [e.g., 3, 7-11].

The present study aims to evaluate the variations in tree height and diameter at base within and among families and individual trees, to estimate their relations, and heritability in 15-years progeny test of the species to discuss on silvicultural and genetic-breeding managements, and other forestry and cultivation practices of *F. ornus*.

Material and Methods

Data Collection

Tree height and diameter at base were important characters in forestry practices because of easy measurement, and biomass estimation. Data of tree height (**H**) and diameter at base (**D₀**) was collected from a 15- years progeny trial established (latitude 37°45' N, longitude 30°35' E, altitude 1050 m) by 30 open pollinated families as three replicates 2x2 m spacing at southern of Türkiye in 2009 (Fig. 1).



Figure 1. A view from the progeny trial

Source: author's composition

Three healthy individuals were sampled from each replicate and family. However, 24 of the families had enough survival for this study. No any practice was applied to the progeny trial such as pruning, fertilization, and removing of trees etc.

Data Analysis

The families was compred for the tree height and diameter at base by following model of Analysis of Variance (ANOVA) at SAS package [12]:

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + B(F)_{j(i)} + e_{ijk} \quad (1)$$

Where Y_{ijk} is the observation from the k^{th} tree of the j^{th} family in the i^{th} replicate, μ is overall mean, $B(F)_{j(i)}$ is effect of the j^{th} family in the i^{th} replicate, and e_{ijk} is random error.

Individual (h_i^2 ; narrow-sense heritability) heritability (h_i^2) used for different purposes in plant science was estimated as [13]:

$$h_i^2 = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_P^2} = \frac{k\sigma_F^2}{\sigma_P^2} \quad (2)$$

σ_A^2 is the additive genetic variance, σ_F^2 is the genetic variance of families or phenotypic variance, k is the covariance coefficient between half-sibs.

Variability of both the phenotype and genotype could be measured, although the genotype was more important from the point of view of breeding, conservation and utilization [3]. Variance components, expressed as coefficient of genetic (CV_g) and phenotypic (CV_p) variations were estimated as:

$$CV_g = 100\sigma_A / \bar{x}$$

$$\text{and } CV_p = 100\sigma_F / \bar{x} \quad (3\&4)$$

Where \bar{x} is overall character mean.

Phenotypic (r_p) and genetic (r_g) correlations between tree height and diameter at breast height were estimated as [14]:

$$r_p = \frac{COV_{f(x,y)}}{\sqrt{\sigma_{f(x)}^2} \sqrt{\sigma_{f(y)}^2}}$$

$$\text{and } r_g = \frac{COV_{g(x,y)}}{\sqrt{\sigma_{g(x)}^2} \sqrt{\sigma_{g(y)}^2}} \quad (5\&6)$$

Where $COV_{f(x,y)}$ is the phenotypic covariance between characters x and y , $\sigma_{f(x)}^2$ and $\sigma_{f(y)}^2$ are the phenotypic variances for characters x and y , respectively. Where $COV_{g(x,y)}$ is the genetic covariance between characters x and y , $\sigma_{g(x)}^2$ and $\sigma_{g(y)}^2$ are the additive genetic variances of characters x and y , respectively.

Results and Discussion

Characters and variations

Means of tree height and diameter at base of the family were 318.5 cm and 62.5 mm in the families, while there were large differences among trees within family for the characteristics. Averages of families ranged from 285.6 cm to 359.2 cm for tree height, and between 55.3 mm and 70.5 mm for diameter at base (Table 1, Fig. 2). The growth increment were lower than young ages of the families [9-11]. There were about 2.6 times difference in both tree height (180 cm and 462 cm) and diameter at base (36.62 mm and 95.87 mm) among individual trees of total families (Table 1). Similar variations were also reported for reproductive traits in the species [15]. Averages of seedling height and diameter at base were 149.5 cm and 24.3 mm in fifth year results of the families [10], and 161.7 cm and 2.3 cm in sixth year results of the progeny [11]. The results indicated that the families showed higher growth performance based on annual growth increments during the last decade. However, there could be many biotic and abiotic factors such as maternal or paternal effect [3], climate, biological characteristics of plants could impact on growth performance of tree species. For instance, 26% higher growth performance could be obtained for the characters by better selection.

Averages and ranges of for the tree height and diameter at base

	Tree height (cm)	Diameter at base (mm)
Average	318.5	62.5
Ranges of families	285.6-359.2	55.3-70.5
Individual ranges	180.0-462.0	36.62-95.87

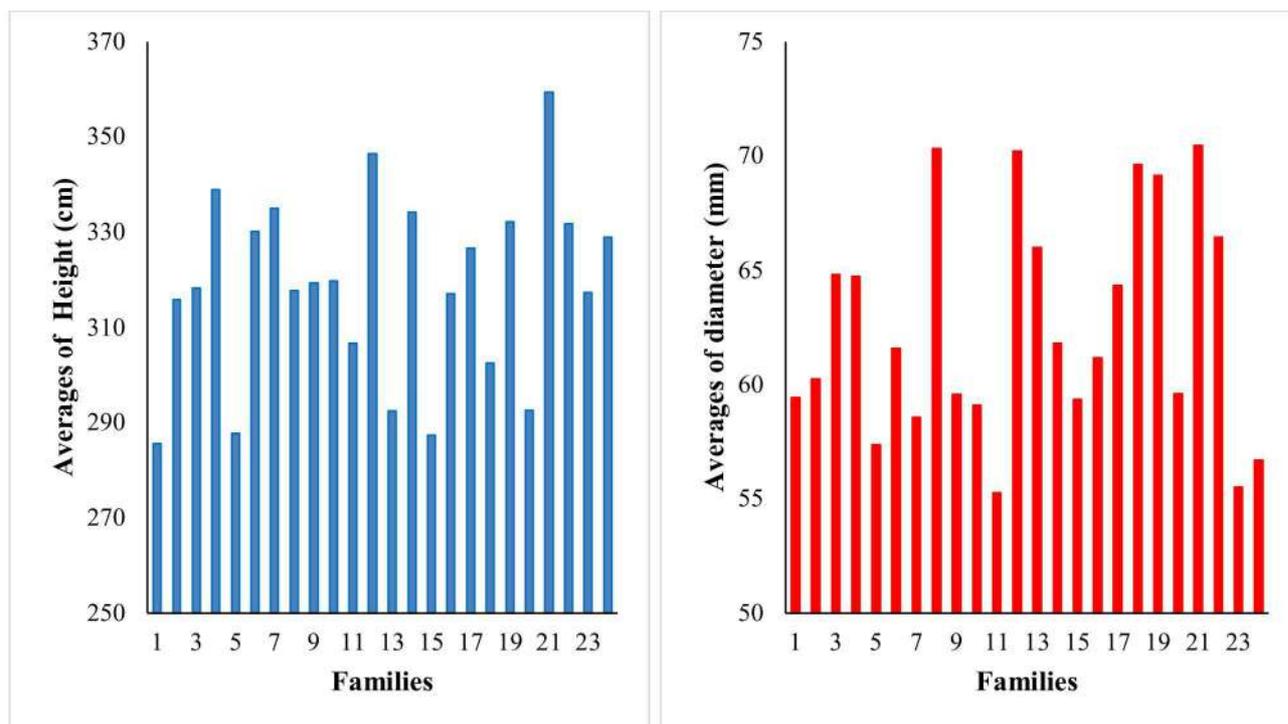


Figure 2. Averages of the characters for the families

Source: author's composition

The individual trees showed also large differences within family. For instance, tree height ranged from 225.0 cm to 336.0 cm, and also diameter at base varied between 43.8 mm and 70.8 mm in first family. They were between 250 cm and 372 cm for tree height, and between 36.7 mm and 70.2 mm for diameter at base in the last family (Table 2). They were getting larger for the characters in pooled families (Tables 1 and 2). Tree height was more variable than tree height in all families based on standard deviation (Table 2). But, standard deviation was the highest in family 15 (77.1) for tree

height, while it was the highest in family 23 (17.0) for diameter at base (Table 2). It was the lowest in family 10 (24.0) for tree height, and in family 16 (5.6) for diameter at base (Table 2). These results showed importance of control pollination and vegetative propagation for higher wood product in plantation forestry of the species. Besides, tree height had higher variation than that of diameter according to calculated standard deviations (45.9 and 12.3) of among families. It indicated that tree height was better selection character for genetic-breeding and other forestry and cultivation purposes.

Table 2

Average, range and standard deviations (SD) for the characters in the families.

Characters						
Family	H (m)			D ₀ (cm)		
	Average	Range	SD	Average	Range	SD
1	285.6	225.0-336.0	34.0	59.4	43.8-70.8	9.5
2	315.9	220.0-370.0	50.7	60.2	41.8-91.5	18.6
3	318.3	280.0-400.0	35.6	64.8	47.5-74.3	8.5
4	338.9	296.0-415.0	33.9	64.7	53.5-77.8	10.2
5	287.7	205.0-380.0	65.3	57.3	44.3-81.8	12.8
6	330.2	300.0-380.0	26.0	61.6	43.6-87.8	12.7
7	334.9	265.0-400.0	45.9	58.5	44.3-81.5	11.6
8	317.8	260.0-366.0	34.0	70.3	60.3-95.9	10.9
9	319.3	220.0-410.0	52.9	59.6	36.6-83.8	15.4
10	319.8	276.0-350.0	24.0	59.1	46.2-69.3	7.7
11	306.8	255.0-366.0	42.3	55.3	42.8-74.8	11.9
12	346.3	264.0-462.0	61.7	70.2	54.2-87.2	12.9
13	292.4	190.0-390.0	66.9	66.0	52.3-81.2	10.4
14	334.1	310.0-410.0	30.9	61.8	43.8-91.5	13.5
15	287.2	180.0-425.0	77.1	59.3	42.6-79.7	11.4
16	317.1	265.0-375.0	35.7	61.2	54.3-67.6	5.6
17	326.7	275.0-360.0	32.1	64.3	46.9-78.7	9.8
18	302.4	242.0-373.0	41.7	69.6	45.0-89.5	15.8
19	332.2	280.0-37.0	31.0	69.1	53.6-80.7	9.3
20	292.6	198.0-355.0	43.3	59.6	50.4-84.6	10.4
21	359.2	290.0-418.0	38.5	70.5	48.6-83.7	13.5
22	331.8	265.0-387.0	38.3	66.5	53.4-77.9	9.1
23	317.3	280.0-362.0	26.3	55.5	40.4-95.5	17.0
24	328.9	250.0-372.0	38.7	56.7	36.7-70.2	9.5

Higher growth variations were reported for the years based on results of early studies on families of the species for different characters [i.e., 8-11,16], and also seed characters in field stage of Manna ash [16,17]. Higher morphological variations among populations and within population for different characters were also reported at nursery stage in Manna ash [8,18], and in Narrow leaved ash [19]. It was reported that like other ash species, Manna ash showed higher variation in vegetative characters (leaves, shoots, bark etc.), and several subspecies and varieties, as well as cultivars, have been describe]. According to results of genetic variation studies had a different geographical focus, although populations were sampled across a much wider geographic area, including Hungary, Italy, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croatia,

Greece, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, and Türkiye [3]. The results emphasized importance of individual selection and characters for higher wood product in the species in genetic-breeding practices of Manna ash.

According to results of analysis of variance, the families showed significant ($p \leq 0.05$) difference for tree height, while families were similar ($p > 0.05$) for diameter at base. However, the variations changed for the years and characters according to results of early studies on the families of the species [i.e., 8-11]. The results indicated importance of future studies.

Familyxreplicate interactions, were not significant ($p > 0.05$) for both tree height and diameter at base, indicated homogeneity of trial area (Table 3). It showed importance of future studies in different areas including arid sides.

Results of analysis of variance.

Characters	Source of variation	Degrees of freedom	Mean of square	P value
Tree height	Family (F)	23	3448.227	$p < 0.05$
	Replicate (R)	2	142.699	$p > 0.05$
	FxR	46	1927.868	$p > 0.05$
	Error	144	1977.690	
	Total	215		
Diameter at base	Family (F)	23	216.524	$p > 0.05$
	Replicate (R)	2	180.921	$p > 0.05$
	FxR	46	135.921	$p > 0.05$
	Error	144	144.578	
	Total	215		

Heritability and correlations

Heritability is used for different purposes such as increasing of quality and quantity of products, or selection target in plant science. The heritability in narrow-sense reflects the share of the variation that depends on the genotypes was very low for the tree height and diameter at base (Table 4) opposite to some seed characters of the families [17]. The heritability did not change dramatically for the years based on results of early studies [i.e., 8-11] in the same objects of the species. They well accordance with results of the present study. For instance, narrow-sense heritability (h_r^2) reflected the share of the variation that depends on the genotypes was very low. It was 0.382 for seedling height, 0.051 for root-collar diameter in sixth year of the progeny [11], and close to zero in fourth and fifth years [9,10]. Low genetic variations were reported in populations of Manna ash [3] opposite to low heritability estimated in the present study. However, it could change for the future years according to rotation age of the species. Besides, it was known that there could be many biotic and abiotic factors could be effective on genetic parameters estimated in Manna ash and different forest tree species [i.e., 20-24]. Manna ash has been defined as an ornamental plant for urban planting sites due to its aesthetic characteristics. It was frequently grown as an ornamental tree in Europe north of

its native range for its decorative flowers-the species was also sometimes called "flowering ash" [25]. *Fraxinus ornus* was also a very valuable tree species in urban forestry, because it does not reach large dimensions, and in spring is very decorative because of its large white inflorescences [3]. It showed importance flowering of the species and estimation of heritability for flowering characters togetherwith woody products in future studies.

The genetic variation, here expressed as the coefficient of variation among families (CV_g), was always lower than the variation among individual seedlings within families (CV_p) (Table 4). The environment seemed to be more important for the performance of genotypes than their genetic constitution. This emphasized importance of forestry practices such as selection of individual seed source, tending and others.

Tree height was both genetic ($r=0.414$) and phenotypic ($r=0.423$) correlated significantly ($p \leq 0.05$) with diameter at base (Fig. 3). Similar correlations were found at nursery stage and different years of the trial [8-11], and phenotypic in outplanting performances of Narrow leaved ash [24], and Common ash [26,27]. The correlation results of this study indicated that the correlations were steady for the years. These results could be used future studies in the species.

Heritability (h^2), coefficient of variation among (CV_g %) and within family (CV_p %)

	Tree height	Diameter at base
h^2	0.21	0.06
CV_g	4.03	2.96
CV_p	7.74	12.27

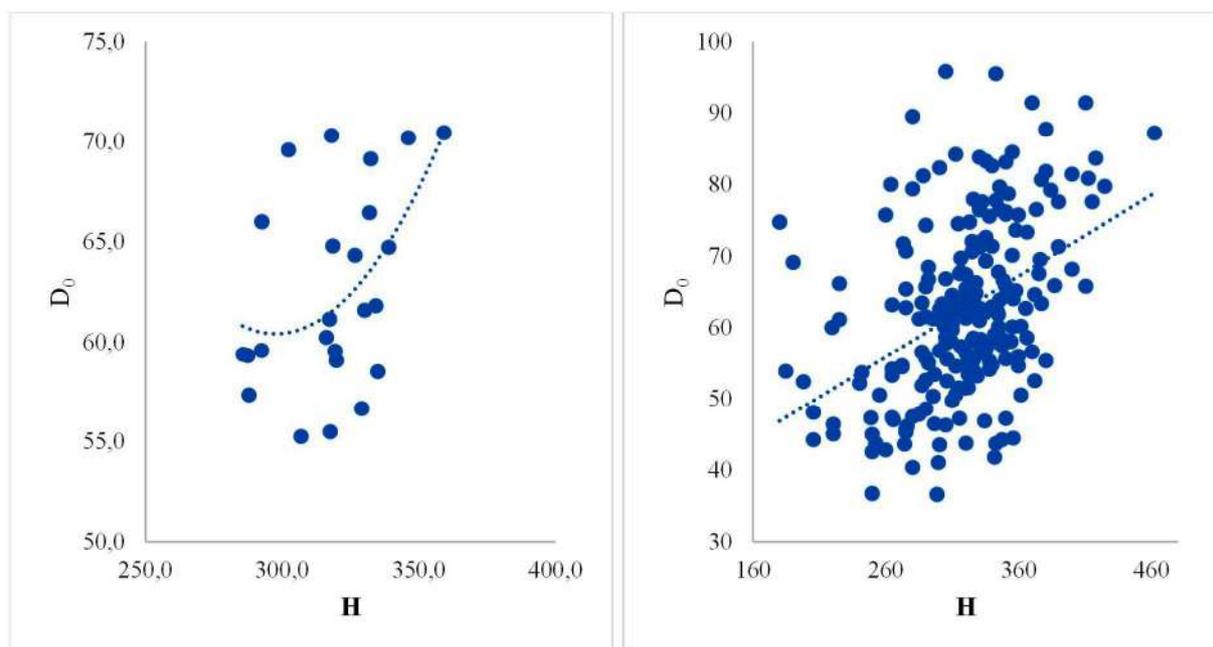


Figure 3. Correlations between tree height (H) and diameter at base (D_0) for family (left side) and individual tree levels (right side).

Source: author's composition

Diameter at base (D_0) could be formulated by tree height (H) as: $D_0 = 0.0027H^2 - 1.5782H + 295.33$ ($R^2 = 0.23$) or $D_0 = 0.113H + 26.54$ ($R^2 = 0.18$) based on the regression analysis (Fig. 3). However, they were not stable based on results of early studies [9-11]. The first equation seemed better estimator than that of second based on higher R^2 value. It could be early to give an accurate equation for future estimations.

Conclusions

Averages of tree height and diameter at base of the family were 318.5 cm and 62.5 mm in the families at 15-years progeny trial, while there were large differences among trees within family for the characteristics. The

narrow-sense heritability was very low for the tree height (0.21) and diameter at base (0.06). There were significant ($p \leq 0.05$) and positive relations between tree height and diameter at base. However, the present study was carried out by limited number of characters, families and area. Results of the study could not be well discussed because of limited number of genetic-breeding studies on the Manna ash. They emphasized importance of future studies. The families and individual trees within family showed variation practically for both tree height and diameter at base. However, the present study could be accepted as early results based on rotation age of the species. So, future studies in different trials, families, and characters including physiological, survival,

stem straight, flowering should be carried to give accurate conclusions by various genetic parameters. However, results of the study could be used in forestry practices of the species. It is clear that Manna ash could be considered as a key species in climate change due to its

biological characteristics. Future trials should be established at different habitats such as arid or semi-arid areas based on biological characteristics of the species and future directions.

References

1. Anonymous. Forest inventory of Turkey. General Directorate of Forestry of Turkey, Ankara, 2024; <https://www.ogm.gov.tr> (access: 04.03.2025) (in Turkish).
2. Ansin R., Özkan Z.C. Spermatophyta. Forestry Faculty of Black Sea Technical University Press. 1993; Trabzon.
3. Fraxigen. Ash Species in Europe: Biological Characters and Practical Guidelines for Sustainable Use. 2015: Oxford Forestry Institute Press.
4. Saatcioglu F. Principal of Silviculture. 1976: Publication of Forestry Faculty of Istanbul University, Istanbul.
5. Chiatante D., Sarnataro M., Fusco S., Di Lorio A., Scippia G.S. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of *Fraxinus ornus* L. and *Spartium junceum* L. growing on slopes. *Plant Biosystems*. 2003; 137:47-55.
6. Tiner W., Conedera M., Gobet E., Hubschmid P., Wehrli M., Brigitta M. Apalaeoecological attempt to classify fire sensitivity of trees in the Southern alps. *The Holocene*. 2000; 565-574.
7. Yuçedag C., Gezer A. The effects of different stratification periods on seed germination and transplanting on some morphological characteristics of flowering ash (*Fraxinus ornus* L.) seedlings. *Journal of Forestry Faculty of Suleyman Demirel University*. 2007; 1:20-27.
8. Bilir N. Variation of seedling morphology in Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) seedlings. *Seed Orchards and Breeding Theory Conference*. Antalya (Turkey), 2012; 107-113.
9. Bilir N., Seyedi N. Fourth year results in variations of Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) families. *Research and Reviews in Biosciences*. 2015; 9:436-440.
10. Tekocak S., Bilir N. Morphological variations in Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) families: Fifth year field Test. *Applied Cell Biology*. 2015; 4:88-93.
11. Güngör N., Tekocak S., Yilmazer C., Erat A.Z., Bilir N. Variations among families of *Fraxinus ornus* L. *Research & Reviews in Biosciences*. 2016; 11:10-14.
12. SAS. Statistical analysis system. SAS Institute, Inc. Cary., N.C.: 2004.
13. Zobel B., Talbert J. Applied Forest tree improvement. John Wiley & Sons. 1984: 505 p. ISBN 9780471096825
14. Falconer D.S. Introduction to quantitative genetics. *Harlow Longman Sci Tech*. 1898: 438 p. ISBN 0 470 21162 8.
15. Slobodní, B., Miňová L., Rácz A., Belčáková I., Štefunková Z. Analysis of chosen growth and reproductive traits of manna ash (*Fraxinus ornus*) with regards to its expansive properties. *Biosystems Diversity*. 2023; 31(2): 217–221. doi:10.15421/012
16. Bili, N. Morphological variation of seedling and seed characteristics in Taurus Flowering ash. *Journal of Bartın of Forestry Faculty*. 2019; 21 (2):525-533. DOI: 10.24011/barofd.535439
17. Bilir N. Heritability of some seed characteristics in Manna ash. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Burdur Mehmet Akif Ersoy University*. 2022; 13(1): 129-133. <https://doi.org/10.29048/makufebd.1088698>
18. Yücedağ C., Gezer A., Fakir H. Variation of *Fraxinus ornus* subsp. *cilicica* (Lingelsh) Yalt in the Lakes District of Turkey. *Scientific Research and Essays*. 2011; 6(22): 4788-4791.

19. Çiçek, N., Çiçek, E., Bilir, N. Some seed and seedling characteristics in Narrow-leaved ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl). *Journal of Forestry Faculty of Süleyman Demirel University*. 2005; A1:17-24.
20. Özbey A.A., Bilir N. Block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia*. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. 2022; 12(2):5-13.
21. Yazıcı N., Effect of species and environmental factors on growth performances in afforestation of *Cedrus libani* and *Pinus brutia*. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2018; 27(10): 6913-6917.
22. Yazıcı N., Babalık A.A., Bilir N. Effect of slope on growth of a Taurus Cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) afforestation: A case study from Dinar. *Anatolian Journal of Forest Research*. 2022; 8(2):1-5. <https://doi.org/10.53516/ajfr.1137004>
23. Yücedağ C., Gezer A. The effects of different stratification periods on seed germination and transplanting on some morphological characteristics of flowering ash (*Fraxinus ornus* L.) seedlings. *Turkish Journal of Forestry*. 2007; 1: 20-27.
24. Çiçek E., Çiçek N., Bilir N. Effects of seedbed density on one-year-old *Fraxinus angustifolia* seedling characteristics and outplanting performance. *New Forests*. 2007; 33:81–91. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9015-6>
25. Mitchell A. F. A Field Guide to the Trees of Britain and Northern Europe. *Collins*. 1974: 416 p. ISBN 0-00-212035-6
26. Maltoni A., Mariotti B., Andrea T., Jacobs D.F. Relation of *Fraxinus excelsior* seedling morphology to growth and root proliferation during field establishment. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2010; 25 (1): 60- 67. DOI: 10.1080/02827581.2010.485805
27. Zoralioğlu T., Uludağ S. Techniques for increasing the productivity by using irrigation and fertilization in ash tree (*Fraxinus excelsior* L.) plantations. Poplar and Fast Growing Forest Trees Research Institute. *Technical Bulletin*. 1998;188, Izmit, Türkiye.

Information about the authors

✉ **Nebi Bilir** - Prof. Dr., Forestry Faculty, Isparta University of Applied Sciences, TR-32260, Isparta, Türkiye, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9911-4304>, e-mail.: nebibilir@isparta.edu.tr

✉ - Для контактов/Corresponding



Закономерности процесса формирования мутовок в куртинах подроста сосны обыкновенной в сосняке брусничном на юге Республики Бурятия

Анатолий В. Грязькин¹, lesovod@bk.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>

Вячеслав В. Горбач² gorbach@petsu.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2326-8539>

Павел А. Феклистов³, pfeklistov@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Борис Б. Климов¹, klimov@bk.ru  <https://orcid.org/0009-0006-1298-4432>

Ольга И. Гаврилова²  ogavril@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, пер. Институтский, 5, корпус У, г. Санкт-Петербург, 194018, Российская Федерация

² Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185960, Российская Федерация

³ Северный арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, 162000, Российская Федерация

Аннотация

Представлены данные по формированию мутовок у подроста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) под пологом сосняка брусничного (*Pinetum vacciniosum*). Для проведения учётных работ использовали метод круговых площадок. Учётные площадки размером по 10 м² были заложены по старой гари на склонах крутизной от 2 до 10 градусов. Высота над уровнем моря от 676 до 845 м. У модельных экземпляров подроста измеряли высоту, определяли возраст и средний прирост, подсчитывали число ветвей в мутовках по годам формирования. Показано, что в «окнах» материнского древостоя подрост образует куртины, в центре которых растения имеют максимальную высоту (до 610 см), а по периметру – минимальную (7 см), то есть молодое поколение сосны в окнах образует своеобразный купол. Возраст, высота и средний прирост подроста варьируют в широких пределах, отклонение распределений их значений от нормального закона указывает на дифференциацию роста растений при неравномерной освещенности. Высота увеличивается с возрастом, с высотой в свою очередь тесно связан средний прирост. У подроста высотой до 30–40 см и у нежизнеспособного подроста мутовки чаще всего не формируются, у более крупного подроста мутовка состоит из 2–4 ветвей, максимальное их число достигает 6. Увеличение числа ветвей в мутовках с увеличением возраста и высоты подроста тесно связано со средним приростом, что наиболее адекватно описывается логарифмической моделью. В 2019 году, согласно модели, максимальное число ветвей в мутовке достигалось при среднем приросте у крупного подроста около 70 см, а в 2022 году при величине прироста 50 см. Число ветвей в мутовке, опосредованно связано с возрастом, высотой и средним приростом.

Ключевые слова: Республика Бурятия, сосняк брусничный, подрост сосны обыкновенной, *Pinus sylvestris*, биометрические характеристики, мутовка

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Для цитирования: Закономерности процесса формирования мутовок в куртинах подроста сосны обыкновенной в сосняке брусничном на юге Республики Бурятия/ А. В. Грязькин, В. В. Горбач, П. А. Феклистов, Б. Б. Климов, О. И. Гаврилова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 15-28. – Библиогр.: с. 24-27 (24 назв.). - DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/2>.

Поступила 24.09.2024. *Пересмотрена* 21.01.2025. *Принята* 27.05.2025. *Опубликована онлайн* 26.06.2025.

Article

Patterns of the process of whorl formation in the curtains of the the young generation of pine of the common in the *Pinetum vaccinosum* forest in the south of the Republic of Buryatia

Abstract

The data on whorl formation in pine undergrowth (*Pinus sylvestris* L.) under the canopy of lingonberry pine (*Pinetum vaccinosum*) are presented. The method of circular plots was used for survey work. Survey plots of 10 m² each were laid along the old burned area on slopes with a steepness of 2 to 10 degrees. The altitude ranged from 676 to 845 m above sea level. The height of model exemplars of undergrowth was measured, age and average growth were determined, and the number of branches in whorls by year of formation was counted. It was shown that in the “windows” of the maternal stand the undergrowth forms clumps, in the center of which plants have maximum height (up to 610 cm), and along the perimeter - minimum height (4-7 cm), i.e., the young generation of pine in the windows forms a kind of dome. Age, height and average growth of young growth vary widely, the deviation of their distributions from the normal law indicates the differentiation of plant growth under uneven illumination. Height increases with age, and average growth is closely related to height. Undergrowth up to 30-40 cm in height and non-viable undergrowth most often do not form whorls, in larger undergrowth whorls consist of 2-4 branches, their maximum number reaches 6. The increase in the number of branches in whorls with increasing age and height of the undergrowth is closely related to the average growth, which is most adequately described by the logarithmic model. In 2019, according to the model, the maximum number of branches in a whorl was reached at an average growth of about 70 cm, and in 2022 at a growth value of 50 cm. The number of branches in a whorl is indirectly related to age, height and average growth.

Keywords: Republic of Buryatia, lingonberry pine forest, pine undergrowth, *Pinus sylvestris*, biometric characteristics, whorl

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

Funding: This study did not receive external funding.

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

For citation: Gryazkin A.V., Gorbach V.V., Feklistov P. A., Klimov B.B., Gavrilova O. I. (2025). Patterns of the process of whorl formation in the curtains of the the young generation of pine of the common in the *Pinetum vaccinosum* forest in the south of the Republic of Buryatia. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 15, No. 2 (58), pp. 15-28 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/2>.

Received 24.09.2024. *Revised* 21.01.2025. *Accepted* 27.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – одна из основных лесообразующих пород в лесном

фонде Российской Федерации, занимающая по покрытой лесом площади второе место после

лиственницы. Эта древесная порода относится к светолюбивым растениям, и может произрастать в широком диапазоне почвенно-грунтовых условий, как на бедных сухих, так и на переувлажненных и заболоченных почвах А. Pintsev и др. (2021) [2], А.В. Грязькин и О.И. Гаврилова (2022) [3], М. В. Ермакова (2024) [1].

Необходимым условием сохранения лесов является естественное возобновление А.И. Салтыкова (2021) [5]. А.В. Грязькина и О.И. Гавриловой (2022) [3], Д. С. Собачкина (2022) [4], Б. Б. Климова и др. (2024) [6]. В малонарушенных лесах процессы формирования и развития древостоев усиливаются после естественного разреживания основного полога посредством естественного отпада или возникающих пожаров. Сосна успешно возобновляется семенным путем. Наилучшие результаты восстановления сосняков отмечают на гарях О.И. Гаврилова и А.В. Грязькин [7], Н.С. Санникова и др. [8]. На вырубках, как указывают Ю.П. Демаков и Т.В. Нуреева (2019) [9], естественное возобновление сосны на месте материнского древостоя успешно протекает в условиях брусничного, верескового и лишайникового типа леса. К.Н. Большегуров и др. (2021) [10], считают, что на заболоченных и на бедных песчаных почвах конкуренты сосны, как правило, отсутствуют. На богатых почвах, независимо от категории земель, сосна вытесняется лиственными породами и елью К.Н. Большегуров и др. (2022) [11]. Низкую конкурентную способность сосна демонстрирует и по отношению к кустарничкам и травянистым растениям. Мохово-лишайниковый ярус в случае образования сплошного ковра также препятствует прорастанию семян, считают Marqués et al. (2021) [12].

Результаты исследований Ch. Shnga et al. (2020) [14], В.Б. Придача и др. (2024)[13], показывают, что если за точку отсчета брать стену леса, то получается симметричная картина по состоянию подроста сосны. На открытой площади до стены леса преобладает жизнеспособный подрост, а под пологом, начиная от стены леса – нежизнеспособные растения. Доля сухого подроста в первом случае составляет не более 3%, а во втором случае может достигать 25-50%. В.Б. Придача с соавторами (2024) [13] отмечают, что под пологом высокополнотных

древостоев молодое поколение сосны чаще всего не выживает, в таких случаях преобладает подрост категории нежизнеспособный и сухой.

На гарях, как правило, встречается подрост сосны разных генераций, что связано с периодичностью плодоношения сосны. В этой связи проявляется определенная закономерность в возрастной структуре подростка. По мнению А. Mostarin (2021) [15] подрост сосны представлен разными возрастными ступенями, соответствующими повторяемости обильных урожаев семян. Условия роста и развития молодого поколения сосны на гарях отличаются от условий на вырубках, пустолях и других категориях земель. Основное отличие состоит в том, что в результате сгорания большого объема органического вещества происходит залповый выброс элементов минерального питания в лесную экосистему. Как считают J. Sklodowski (2020), [16], L.E. Frelich (2020) [17], Anderegg W.R.L., et al (2020) [18], в этой связи на гари создаются более благоприятные условия для роста любых растений, включая и лесообразующие породы.

Лесной фонд республики Бурятии характеризуется большой долей сосновых лесов. Чаще всего это чистые по составу древостои. Основная часть сосняков встречается по склонам разной экспозиции и крутизны, считают А. В. Лебедев [19] и S. Gerelbaatar (2021) [20]. Для сухих боров-характерны бедные песчаные почвы часто без гумусового горизонта, отмечают О.И. Гаврилова и А.В. Грязькин, (2022) [7]. Интенсивная промываемость почв обуславливает быстрое уменьшение минеральных веществ в верхних горизонтах почвы. Всё это оказывает заметное влияние на структуру и состояние подростка сосны. По исследованиям А.И. Салтыкова (2021) [5], молодое поколение сосны обычно образует куртины в «окнах» материнского древостоя. В центре такой куртины растения имеют максимальную высоту, а по периметру – минимальную, то есть образуется своеобразный купол, представленный растениями разного возраста и высоты.

Динамика роста молодого поколения сосны исследована достаточно подробно. Так, этими вопросами занимались О.И. Гаврилова и А.В. Грязькин (2022) [3], Д. С. Собачкин (2022) [4], А.И. Салтыков (2021) [5], но информативным показателем

успешности процесса восстановления может быть и число ветвей в мутовках. Установлено, что количество ветвей в мутовках подроста сосны зависит от возраста, высоты и величины среднего прироста. Сведений по этим биометрическим характеристикам подроста сосны существенно меньше [3-5]. Практически отсутствуют публикации по габитусу и структуре кроны подроста. Работ, посвящённых связи числа ветвей в мутовке с возрастом, высотой и величиной прироста, нет.

Цель исследования – установление зависимости между биометрическими характеристиками подроста сосны, произрастающего в окнах под пологом сосняка брусничного, и числом ветвей в мутовках по годам их формирования в условиях республики Бурятия.

Материалы и методы

Объект исследования – подрост сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) под пологом сосняков. Исследования проводили на юге республики Бурятия на территории Зун-Хурайского лесничества (52° 05'831'' с.ш., 110° 05'814'' в.д.). Опытный участок площадью 42 га расположен на высоте от 676 до 845 м над уровнем моря. Почвы сухие, песчаные со слаборазложившейся лесной подстилкой мощностью 6-12 см, сложенной хвоей сосны, шишками и сухими побегами.

Древостой представлены сосняками брусничными 4 класса бонитета, чистыми по составу, с неравномерным распределением деревьев по площади и наличием окон разного размера. Древостой многократно пройдены низовым пожаром. Последний низовой лесной пожар на объектах исследования случился 14-15 лет назад. В окнах встречается подрост сосны, который обычно формирует куртины разного размера (рис. 1). В куртинах подрост представлен разными генерациями, соответствующими повторяемости семенных лет с обильным урожаем (5-8 лет). Возрастной диапазон подроста составляет 4-21 год. Высота подроста варьирует от 10-15 см до 5-6.1 м. Общая густота не превышает 1000 экз./га.

Подлесок практически отсутствует, встречаются единичные особи рябины сибирской (*Sorbus*

aucuparia subsp. *sibirica* ((HEDL.) KRYLOV), можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica* Burgsd), жимолости Максимовича (*Lonicera maximowiczii* ((RUPR.) MAXIM.). Общая численность подлесочных пород около 150 экз./га. Живой напочвенный покров представлен преимущественно ксерофитными и олиготрофными растениями. Преобладают купена многоцветковая (*Polygonatum multiflorum* (L.) ALL.), вереск (*Calluna vulgaris* (L.) HILL и несколько видов мхов и лишайников.

Предмет исследования – закономерности формирования мутовок у подроста сосны, произрастающего куртинами разного размера.

Измерения подроста выполнены в августе 2022 года на трех участках исследуемого лесного массива, различающихся по категории земель и расположению относительно профиля рельефа местности (табл. 1). Для учёта подроста на каждом участке по свободному ходу закладывали круговые площадки, радиусом 178,5 см в количестве 36-48. На площадке были отобраны модельные деревья из всех возрастных групп подроста сосны. Общее число моделей составило 232 экземпляра. У каждого модельного экземпляра определяли возраст по числу приростов каждого года, измеряли высоту с точностью до 5 см, величину прироста по годам с точностью до 1 см. Кроме этого учитывали число ветвей в мутовках, сформировавшихся в 2019-2022 годах.

Распределение моделей по указанным выше биометрическим характеристикам значительно отклоняются от нормального (табл. 1) и не могут быть нормализованы с помощью стандартных процедур. Поэтому для статистической обработки выборок использовали методы ресамплинга, не требующие соответствия каким-либо теоретическим закономерностям [Шитиков, Розенберг, 2013]. Для обобщенного описания вариационных рядов использовали три показателя – среднюю арифметическую (M), стандартное отклонение (S), измеряющее изменчивость признака, и медиану (Me), более адекватный, чем средняя показатель величины признака в выборках, отклоняющихся от нормального распределения. Диапазон варьирования показателей оценивали посредством простого непараметрического бутстрепа с числом итераций $B = 1000$, – достаточным для уровня вероятности $P = 0.95$, доверительные интер-

Естественные науки и лес

валы устанавливали методом процентиля по Шитикову и Розенбергу (2013). Для сравнения использовали рандомизационный тест (Monte-Carlo Randomization, MCR-тест) с тем же числом итераций B . Значимость отличий p при таком подходе представ-

ляет собой скорректированную долю нуль-модельных комбинаций (эмпирическая разность показателей не больше рандомизированной, $|d_{obs}| \leq |d_{ran}|$) от общего числа испытаний B . Критической величиной для p принято стандартное значение $\alpha = 0.05$.



Рисунок 1. Куртина с крупным подростом сосны в окне большого диаметра

Figure 1. Curtain with large pine undergrowth in a large-diameter window

Источник: собственная фотография авторов

Source: author's composition

Таблица 1

Общая характеристика объектов исследования

Table 1

General characteristics of the research objects

Показатели Indicators		Участок 1 Plot 1	Участок 2 Plot 2	Участок 3 Plot 3
Категория земель/ Area category		Гарь 2015 года/ forest lands after fires 2015	Гарь 2015 года/ forest lands after fires 2015	Гарь 2014 года/ forest lands after fires 2014
Высота над уровнем моря, м Height above sea level, m		676	724	845
Часть склона/ Part of the slope		подножие/the lower part of the slope	средняя / the middle part of the slope	верхняя /the upper part of the slope
Уклон, градусы / Slope, degrees		2–4	6	10
Число модельных деревьев Number of model trees	n	36	30	186
Возраст деревьев, лет	lim	4-18	4-18	4-21
	M	13.3 (11.9–14.6)	12.1 (9.6–13.8)	14.1 (13.5–14.7)

Age of trees, years	<i>S</i>	4.2 (2.8–5.0)	4.6 (3.7–5.2)	4.0 (3.6–4.4)
	<i>Me</i>	15.0 (13.0–15.0)	12.0 (8.5–15.0)	15.0 (14.0–15.0)
Высота деревьев, см Tree height, cm	<i>lim</i>	7–610	4–260	4–500
	<i>M</i>	165 (116–224)	78 (54–108)	152 (137–166)
	<i>S</i>	165 (112–203)	76 (56–91)	104 (94–115)
	<i>Me</i>	86 (70–180)	60 (29–75)	138 (105–170)
Средний прирост, см Average growth, cm	<i>lim</i>	0.6–40.7	1.0–17.3	1.0–23.9
	<i>M</i>	11.0 (8.0–14.2)	5.9 (4.3–7.8)	9.7 (8.9–10.5)
	<i>S</i>	10.1 (6.6–10.8)	4.8 (3.1–5.8)	5.3 (4.7–5.7)
	<i>Me</i>	6.4 (4.9–10.8)	4.0 (3.3–5.7)	8.8 (7.5–10.6)

Примечание. *lim* – диапазон варьирования признака, *M* – средняя арифметическая, *S* – стандартное отклонение, *Me* – медиана, в скобках указаны доверительные интервалы статистик, оцененные бутстреп-методом; значение критерия Шапиро-Уилка (тест на нормальность) для всех выборок $W > 0.807$, значимость отличий эмпирического распределения от нормального $p < 0.001$.

Note. *lim* is the range of variation of the trait, *M* is the arithmetic mean, *S* is the standard deviation, *Me* is the median, the confidence intervals of the statistics estimated by the bootstrap method are shown in parentheses; the value of the Shapiro-Wilk criterion (normality test) for all samples is $W > 0.807$, the significance of differences in the empirical distribution from the normal is $p < 0.001$.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Сопряженную изменчивость признаков изучали посредством корреляционного и регрессионного анализа. Распределение вариантов в выборках проверяли на соответствие двумерному нормальному распределению методом Мардиа (Mardia's skewness and kurtosis test) [21]. Выборки, описывающие связь возраста и высоты деревьев, высоты и среднего прироста, на всех трех участках значительно отклоняются от нормального закона (критерий Мардиа: для асимметрии $\kappa > 21.29$, $p < 0.001$, для эксцесса $\kappa > 3.88$, $p < 0.001$). Поэтому для оценки силы связи был использован ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Значимость отличий значений коэффициента от нуля оценивали, используя рандомизационный тест с числом итераций $B = 1000$ и z -аппроксимацией [22]. Все выборки, описывающие связь прироста и числа ветвей в мутовке, соответствуют двумерному нормальному распределению (критерий Мардиа: для асимметрии $\kappa < 9.34$,

Результаты

Профиль куртин специфичен по строению: в центре растения имеют максимальную высоту (до 260–610 см, табл. 1), а по периметру – минимальную (от 4–7 см), то есть образуют своеобразный купол (рис. 1). Возраст, высота и средний прирост подроста, оцененные по модельным экземплярам, варьируют в широких пределах (табл. 1). Отклонение показателей от нормального распределения указывает

$p > 0.053$, для эксцесса $\kappa < 1.58$, $p > 0.115$). Для описания сопряженной изменчивости этих признаков применяли регрессионный анализ. Адекватность регрессионных моделей исходным данным оценивали методом наименьших квадратов, в качестве показателя степени адекватности используя коэффициент детерминации R^2 [23]. Значения модельных параметров (коэффициентов регрессии) подбирали с помощью итерационной процедуры подгонки (R функции *nls*) [24], значимость их отличий от нуля оценивали по критерию Стьюдента. Диапазоны варьирования коэффициентов корреляции и регрессии устанавливали методом процентилей после бутстрепирования, сравнивали с помощью MCR-теста.

Данные обрабатывали в среде MS Excel и R 4.4.0 [24] с использованием базовых функций и функций пакетов 'QuantPsys' [21], 'coin' [22], 'compositions' [23].

на интенсивный процесс дифференциации роста растений в связи с неравномерностью освещенности под пологом леса, а также частичным его повреждением в год пожара.

Особенность подростка сосны высотой до 30–40 см состоит в том, что боковые ветви, образующие мутовки на таких экземплярах не формируются. Не редко мутовка не формируется также у более

крупных экземпляров, отнесенных к категории «нежизнеспособный подрост». У остальных обычно имеется 2-4 ветви, максимальное число ветвей в мутовке доходит до 6. Общая закономерность состоит в том, что число ветвей увеличивается с возрастом, по мере роста дерева и, следовательно, зависит от величины среднего общего прироста.

Результаты исследования показали, что различия по возрасту деревьев и его изменчивости на всех участках случайны (MCR-тест для средних арифметических, стандартных отклонений и медиан: $p > 0.056$). Различия по высоте и среднему приросту на участках 1 и 3 случайны (табл. 1, MCR-тест для средних арифметических и медиан: $p > 0.137$), на участке 2 деревья были ниже и имели меньший прирост (MCR-тест: $p < 0.022$). Изменчивость по высоте и приросту деревьев наибольшая на участке 1, наименьшая – на участке 2: все различия стандартных отклонений значимы (MCR-тест: $p < 0.044$), за исключением изменчивости прироста на участках 2 и 3 (MCR-тест: $p = 0.429$).

Высота деревьев увеличивается с возрастом. Значения коэффициента корреляции Спирмена равны 0.663, 0.840 и 0.864 для 1, 2 и 3 участков, соответственно. Отличия коэффициентов от нуля во всех случаях значимы (MCR-тест: $z > 3.92$, тест: $p > 0.247$). С высотой деревьев в свою очередь тесно связан средний прирост, значение коэффициента Спирмена для перечисленных участков составило 0.984, 0.970 и 0.973, отличия от нуля значимы коэффициентами случайны (MCR-тест: $p > 0.956$). Поскольку сила связи приближается к единице, спецификой выборок значений высоты деревьев и среднего прироста можно пренебречь и далее изучать сопряженную изменчивость числа ветвей в мутовках по одному, любому из них. Поскольку двумерное распределение значений среднего прироста и числа ветвей в мутовках соответствует нормальному закону во всех случаях (см. Материалы и методы), в качестве показателя для изучения динамики формирования мутовок выбрали средний прирост деревьев. Тренд ежегодного увеличения числа ветвей в мутовках наиболее адекватно описывается логарифмической моделью $N = a \ln(L) + b$, где N – число

ветвей, L – средний прирост в см, модельный параметр a определили в качестве средней скорости увеличения числа ветвей, параметр b как точку старта процесса. Назначение коэффициента $b = \text{const}$ для всех выборок снижает степень адекватности моделей, но дает возможность сравнивать скорости (коэффициенты a). Значения b в исходных моделях варьировало от -0.629 до -1.271 на участке 1, от на участке 3. Различия между двумя первыми участками не значимо (MCR-тест: $p = 0.192$), но оба отличаются от третьего (MCR-тест: $p < 0.029$), указывая на то, что здесь число ветвей в мутовке, такое же как на участках 1 и 2, в начале процесса возобновления формировалось при меньшем среднем приросте деревьев. По результатам изучения всех исходных моделей b принято равным -1, величине эквивалентной медианному значению совокупности рассчитанных значений параметра b . Сравнение значений параметра a подобранных моделей (табл. 2) показывает, что скорость увеличения числа ветвей в мутовках возрастала со временем на всех участках: все наблюдаемые различия a между 2019 и 2022 годом значимы (MCR-тест: $p < 0.039$). Однако этот рост был неравномерным, на что указывает случайность различий между 2019 и 2020, 2021 и 2022 годом на всех участках (MCR-тест: $p > 0.177$). Установлено, что в один и тот же год рост числа ветвей в мутовках проходил с одинаковой скоростью на всех участках описания наблюдаемых процессов выборки с разных участков были объединены.

Для объединенных выборок подобраны новые модели с $b = -1.45$ (табл. 2). Значение параметра a здесь более дифференцировано, чем в исходных моделях. Скорости образования ветвей в мутовках по мере роста деревьев значимо различаются между всеми годами (MCR-тест: $p < 0.030$) за исключением пары 2019 и 2020 гг. (MCR-тест: $p = 0.252$). Согласно модели, максимальное число ветвей (6) в мутовке в 2019 году достигалось при среднем приросте около 70 см, а в 2022 году уже при 50 см (параметры моделей и их статистические оценки даны в табл. 2). Хотя число ветвей в мутовках некоторых модельных деревьев на исследуемых участках к концу исследования

Естественные науки и лес

было максимальным, процесс увеличения числа ветвей в целом еще не стабилизировался (модельные

кривые не вышли на плато, рис. 2) и в следующие годы, по-видимому, продолжился.

Таблица 2

Параметры моделей связи числа ветвей в мутовках со средним приростом деревьев

Table 2

Parameters of models of the relationship between the number of branches in whorls and the average growth of trees

Parameters of models of the relationship between the number of branches in whorls and the average growth of trees

Участки/Plot	Год /Years	<i>a</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>R</i> ²
Модель / a model $N = \alpha \ln(L) - 1$					
Участок 1	2022	1.923	1.835	2.021	0.825
Plot 1	2021	1.730	1.601	1.882	0.699
	2020	1.550	1.421	1.660	0.729
	2019	1.550	1.445	1.635	0.795
Участок 2 Plot 2	2022	1.550	1.445	1.635	0.795
	2021	1.499	1.332	1.637	0.689
	2020	1.476	1.338	1.574	0.798
	2019	1.250	1.087	1.406	0.594
Участок 3 Plot 3	2022	1.684	1.635	1.739	0.694
	2021	1.614	1.554	1.665	0.688
	2020	1.500	1.449	1.553	0.638
	2019	1.445	1.400	1.497	0.624
Модель / a model $N = \alpha \ln(L) - 1.45$					
Все участки	2022	1.924	1.885	1.973	0.725
All plots	2021	1.821	1.780	1.866	0.707
	2020	1.704	1.649	1.750	0.691
	2019	1.644	1.591	1.681	0.676

Примечание. N – число ветвей, L – средний прирост в см, min и max – интервал варьирования значений параметра a, оцененные бутстреп-методом, R2 – коэффициент детерминации, отличия всех значений параметра a от нуля значимы: критерий Стьюдента $t > 16.58$, $p < 0.001$.

Note. N – is the number of branches, L – is the average increase in cm, min and max are the range of variation of the values of parameter a estimated by the bootstrap method, R2 – is the coefficient of determination, the differences of all values of parameter a from zero are significant: Student's criterion $t > 16.58$, $p < 0.001$.

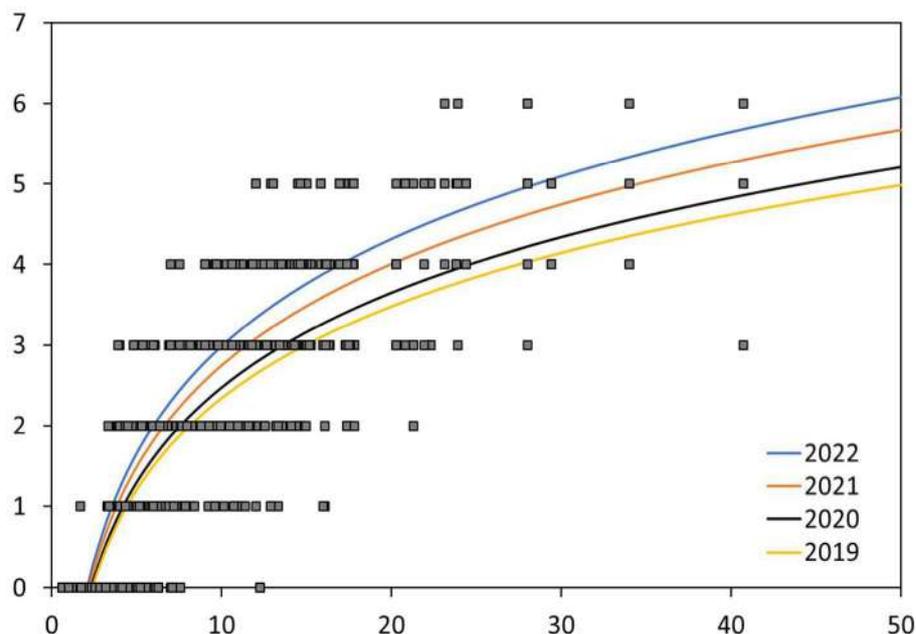


Рисунок 2. Увеличение числа ветвей в мутовках по мере роста сосны (по оси X прирост в высоту, см/год; по оси Y – количество ветвей в мутовке, шт)

Figure 2. An increase in the number of branches in the whorls as the pine grows

(on the X-axis, the increase in height, cm/ year; on the Y-axis, the number of branches in the whorl, pcs)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Обсуждение

Состояние и количество подроста в сосняках зависит от освещенности и степени минерализации почвы, как обоснованно считают А. Илнтсев и др. (2021) [2], А.В. Грязькин и О.И. Гаврилова (2021), [3], А.И. Салтыков (2021) [5]. М. В. Ермакова (2024) [1], Б. Б. Климов и др. (2024) [6]. Под пологом сосняков на бедных сухих почвах подрост формируется куртинами в «окнах». Расположение наиболее высоких растений в центре куртин объясняется оптимальными условиями освещенности. Наблюдаемое широкое варьирование биометрических характеристик подроста в куртине объясняется разным возрастом молодого поколения сосны. Новые генерации подроста связаны с годами обильных урожаев семян сосны. По наблюдениям сотрудников лесничества, такие годы повторяются только раз в 5-8 лет, что связано с неблагоприятными погодными условиями региона для формирования семян во временных интервалах между ними.

Показателем энергии роста молодняков может быть не только возраст, высота и средний прирост, но и число ветвей в мутовке. Установлено, что у крупного жизнеспособного подроста мутовки последних лет формирования состоят из 4-6 ветвей, а у угнетенного подроста могут не сформироваться вовсе. Число ветвей, опосредованно связанное с возрастом, высотой и средним приростом, можно использовать в качестве индикатора жизнеспособности подроста и успешности естественного возобновления сосны.

Естественное возобновление сосны зависит от условий произрастания, в нашем случае от расположения участка. Выше по склону оно менее успешное (опытный участок № 2) по сравнению с участком 1, расположенным у подножия склона (см. табл. 1). Отсутствие значимых отличий по высоте подроста и их среднему приросту между наиболее высоко расположенным участком 3 и участком 1, по-видимому, связано с более ранним началом появления подроста на участке 3 (пределный возраст подроста

21 год против 18 лет). Предположение о замедленном формировании древостоя на участке № 3 поддерживают результаты моделирования. При этом увеличение числа ветвей в мутовках по мере роста деревьев остается величиной относительно постоянной на всех опытных участках. Моделирование процесса формирования мутовок показало его неравномерность во времени. Наблюдаемые ускорения и замедления, по-видимому, связаны с погодными условиями сезона.

На основании проведенной работы в сухих сосняках Бурятии удалось установить, что количество ветвей в мутовке – величина не постоянная и зависит от целого ряда факторов. Как показали исследования, количество ветвей в мутовке зависит от величины среднего текущего прироста, которая тесно связана с высотой деревьев. Это направление исследований ещё слабо освещено в научной литературе, поэтому целесообразно продолжение работ в данном направлении.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена прямая связь между биометрическими характеристиками подроста сосны и количеством ветвей в мутовке. Главные характеристики, отражающие связь с числом ветвей в мутовке – высота подроста, его возраст и средний общий прирост. По-

скольку средний общий прирост зависит как от возраста, так и от высоты подроста, то целесообразнее указанную зависимость устанавливать с использованием величины среднего общего прироста. Опосредовано количество ветвей в мутовке зависит и от режима освещенности, площади куртины подроста, т.е. от размеров окон, в которых формируется молодое поколение сосны. Установлено, что большие куртины подроста сосны в окнах имеют в профиле куполообразную форму. В середине куртины – самые крупные растения, а по периметру куртины – преимущественно мелкие. В составе периферийного подроста имеются нежизнеспособные и сухие особи.

Жизнеспособный подрост в мутовке каждого года формирования содержит от 4 до 6 ветвей. Мутовки нежизнеспособного подроста сосны состоят, как правило, из 1-2 веток. В редких случаях в мутовке нежизнеспособного подроста встречается 3 ветки. У нежизнеспособного подроста в отдельные годы мутовка не формируется вовсе, или формируется только одна боковая ветвь. Сухой подрост содержит не более одной ветки и только лишь в некоторых мутовках. Следовательно, количество ветвей в мутовках можно использовать в качестве объективного индикатора жизнеспособности подроста сосны.

Список литературы

1. Ермакова М. В. Структурно-функциональная организация естественных молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 9-летней вырубке сосняка брусничникового Среднего Урала // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 36–53. Режим доступа: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/3>.
2. Plintsev A., Soldatova D., Bogdanov A., Koptev S., Tretyakov S. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone // Journal of Forest Science. 2021; (1). 67: 21-35. DOI : <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.
3. Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Биометрические характеристики хвой подроста сосны, произрастающего на гари // Лесотехнический журнал. – 2022. 12 (1). – С 21–31. – Режим доступа: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.1/2>.
4. Собачкин Д. С., Собачкин Р. С., Петренко А. Е. Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценотического статуса // Сибирский лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 34–39. – Режим доступа: <https://doi.org/10.34220/issn.10.15372/SJF20220304>.
5. Салтыков А. И. Всплески естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don): синхронность и общие закономерности // Экосистемы. – 2021. – Вып. 27. – С. 23–35. Режим доступа: <https://doi.org/10.37279/2914-4738-2021-27-23-35>.
6. Климов Б.Б., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Особенности естественного возобновления сосны под пологом сухих сосняков Бурятии. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. - Т. 248. –С. 123-137 Режим доступа: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.123-137>.

7. Гаврилова О. И., Грязькин А. В. Особенности самовозобновления сосны на гари // Лесной вестник. Forestry bulletin. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 69–74. – Библиогр. 70–72 (26 назв.). Режим доступа: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74.
8. Санникова Н. С., Санников С. Н., Кочубей А. А., Петрова И. В. Естественное возобновление сосны на гаях в лесостепи Западной Сибири // Сибирский лесной журнал. – 2019. – № 5. – С. 22-29. – Режим доступа: 10.15372/SJFS20190503.
9. Демаков Ю.П., Нуреева Т.В. Закономерности изменения рангового положения деревьев по их размерам в ценопопуляциях сосны обыкновенной // Лесоведение. – 2019. – № 4. – С. 274–285. Режим доступа <https://doi.org/10.1134/S0024114819030021>.
10. Башегуров К. Н., Залесов С. В., Мельникова К. В. И др. Древесная растительность на вырубках Тюменского Севера // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – Ч. 1. – № 6-3 (108). – С. 63-77. – Режим доступа: <https://doi.org/10.2367/IRJ.2022.116.2.020>
11. Башегуров К. Н., Залесов С. В., Морозов А. Е., Попов А. С. Накопление подростa сосны обыкновенной на вырубках в подзоне северной тайги// Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 2 (116). – С. 123-127. Режим доступа: <https://doi.org/10.2367/IRJ.2022.116.2.020>.
12. Придача В.Б., Пеккоев А.Н., Неронова Я.А. Особенности роста и структуры древесины сосны на вырубке и под пологом древостоя в условиях Республики Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2024. – № 4. – С. 92–105. Режим доступа: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-92-105>.
13. Ch. Shnga, N.C. Coops, M.A. Wulder et al. Update and spatial extension of strategic forest inventories using time series remote sensing and modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020; 84: 1229-1241. DOI: 10.1177/0309133309342643.
14. Marqués L., Camarero J. J., Zavala M.A. et al. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? *Trees*. 2021; 35: 1207-1219. DOI: 10.1007/s00468-021-02109-8.
15. Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests. *Scandinavian Journal of forest research*. 2021; 37. 1. 14-22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133.
16. Sklodowski J. Two directions of regeneration of post-windthrow pine stands depend of composition of the undergrowth and the soil environment. *Forest ecology and management*. 2020; 461. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117950.
17. Frelich L.E. Boreal and Taiga Biome. *Encyclopedia of the World's Biomes*. 2020.; 103–115. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.11926-8.
18. Anderegg W.R.L., Trugman A.T, Badgley G. et al. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*. 2020; 368 (6497). 7005. DOI: 10.1126/science.aaz7005.№24.
19. Лебедев А. В. Динамическая модель роста сосновых древостоев европейской части России по данным повторных наблюдений // Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 4. – С. 72–83. DOI: 10.15372/SJFS20240407.
20. Gerelbaatar S., Baatarbileg N., Battulga P., Batsaikhan G., Khishigjargal M., Batchuluun T., Alexander G. Which selective logging intensity is most suitable for the maintenance of soil properties and the promotion of natural regeneration in highly continental Scots pine forests – results 19 years after harvest operations in Mongolia. *J. For.* 2019; 10 (141): 21-22. DOI: 10.3390/f10020141.
21. Fletcher T. D. (2022). Package ‘QuantPsyc’. *Quantitative Psychology Tools*. Ver. 1.6. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/QuantPsyc/QuantPsyc.pdf>. Accessed on 12.10.2022
22. Hothorn T., Winell H, Hornik K, van de Wiel M. A., Zeileis A. (2023). Package ‘coin’. Conditional Inference Procedures in a Permutation Test Framework. Ver. 1.4-3. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/coin/coin.pdf>. (Accessed on 26.09.2023)

23. van den Boogaart K. G., Tolosana-Delgado R., & Bren M. (2022). Package 'composition'. Compositional data analysis. Ver. 2.0-4. Available online: <https://cran.microsoft.com/web/packages/compositions/compositions.pdf>. (Accessed on 10.04.2022)
24. Team R Core (2024) R: a language and environment for statistical computing. R version 4.4.0 (2024-04-24). R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available online: <http://www.r-project.org>.

References

1. Ermakova, M. V. *Strukturno-funkcional'naya organizatsiya estestvennykh molodnyakov sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) na 9-letnej vyрубke sosnyaka brusnichnikovogo Srednego Urala* [Structural and functional organization of natural young growth of scots pine (Pinus sylvestris L.) on a 9-year-old cutting of cranberry pine in the Middle Urals]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2024; 14 ((2 (54): 36-53. Bibliogr.: pp. 50-53 (24 titles). (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/3>.
2. Ilintsev A., Soldatova D., Bogdanov A., Koptev S., Tretyakov S. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone. *Journal of Forest Science*. 2021; (1). 67: 21-35. DOI : <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.
3. Gryazkin A.V., Gavrilova O.I. *Biometricheskie harakteristiki hvoi podrosta sosny proizrastayushchego na-gari Biometric characteristics of pine needles growing on burning* [Biometric characteristics of pine undergrowth needles growing on burnt areas] *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Journal*. 2022; 12 (1): 21-31. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.1/2>.
4. Sobachkin D.S., Sobachkin R.S., Petrenko A.E. *Osobennosti rosta i produktivnosti sosnovykh molodnyakov, sformirovannykh iz derev'yev razlichnogo tsenoticheskogo statusa* [Features of growth and productivity of pine young stands formed from trees of different cenotic status] *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Forestry Journal*. 2022; 3. 34-39. (in Russ.) DOI <https://doi.org/10.34220/issn 10.15372/SJF20220304>.
5. Saltykov A. I. *Vspleski yestestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) i sosny krymskoy (Pinus pallasiana D. Don): sinkhronnost' i obshchiye zakonomernosti* [Bursts of natural regeneration of Scots pine (Pinus sylvestris L.) and Crimean pine (Pinus pallasiana D. Don): synchronicity and general patterns] *Ekosistemy = Ecosystems*. 2021; 27:23-35. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.37279/2914-4738-2021-27-23-35>.
6. Klimov B.B., Gryazkin A.V., Gavrilova O.I. *Osobennosti yestestvennogo vozobnovleniya sosny pod pologom sukhikh sosnyakov Buryatii* [Features of natural regeneration of pine under the canopy of dry pine forests in Buryatia] *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii = Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*. 2024; (248): 123-137. (in Russ.) <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.123-137>.
7. Gryazkin A.V., Gavrilova O.I. *Osobennosti samovozobnovleniya sosny na gari*. [Features of self-renewal of pine on burnt areas]. *Lesnoy vestnik = Forestry bulletin*. 2022; 3(26): 69-74. (in Russ.) DOI 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74.
8. Sannikova N. S., Sannikov S. N., Kochubey A. A., Petrova I. V. *Yestestvennoye vozobnovleniye sosny na garyakh v lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Natural regeneration of pine on burnt-out areas in the forest-steppe of Western Siberia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Forestry Journal*. 2019; 5:22-29. (in Russ.) DOI 10.15372/SJFS20190503.
9. Demakov Yu. P., Nureeva T. V. *Zakonomernosti izmeneniya rangovogo polozheniya derev'yev po ikh razmeram v tsenopopulyatsiyakh sosny obyknovnoy* [Patterns of changes in the rank position of trees by their size in the cenopopulations of scots pine] *Lesovedeniye = Forestry*. 2019; 4: 274-285. (in Russ.) DOI: 10.1134/S0024114819030021.
10. Bashegurov K. N., Zalesov S. V., Melnikova K. V. et al. *Drevesnaya rastitel'nost' na vyrubkakh Tyumenskogo Severa* [Woody vegetation in clearings of the Tyumen North] *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = Research Journal*. 2021; 1. ((6-3 (108): 63-77. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.2367/IRJ.2022.116.2.020>.
11. Bashegurov K. N., Zalesov S. V., Morozov A. Ye., Popov A. S. *Nakopleniye podrosta sosny obyknovnoy na vyrubkakh v podzone severnoy taygi*. [Accumulation of Scots pine undergrowth in clearings in the northern taiga subzone]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2022; 2 (116): 123-127. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.2367/IRJ.2022.116.2.020>.

12. Pridacha V.B., Pekkoev A.N., Neronova Ya.A. *Osobennosti rosta i struktury drevesiny sosny na vyрубке i pod pologom drevostoya v usloviyakh Respubliki Karelii* [Features of growth and structure of pine wood in a felling area and under a canopy of a tree stand in the conditions of the Republic of Karelia] *Izv. vuzov. Lesn. Zhurnal= Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal). 2024; 4. 92–105. (in Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-92-105>.
13. Ch. Shnga, N.C. Coops, M.A. Wulder et al. *Update and spatial extension of strategic forest inventories using time series remote sensing and modeling*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020; 84:1229–1241. DOI: 10.1177/0309133309342643.
14. Marqués L., Camarero J. J., Zavala M.A. et al. *Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter?* *Trees*. 2021; 35: 1207-1219. DOI: 10.1007/s00468-021-02109-8.
15. Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. *Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests*. *Scandinavian Journal of forest research*. 2021; 37 (1): 14-22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133.
16. Sklodowski J. *Two directions of regeneration of post-windthrow pine stands depend of composition of the undergrowth and the soil environment*. *Forest ecology and management*. 2020; 461. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117950.
17. Frelich L.E. *Boreal and Taiga Biome*. *Encyclopedia of the World's Biomes*. 2020; 103–115. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.11926-8.
18. Anderegg W.R.L., Trugman A.T., Badgley G. et al. *Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests*. *Science*. 2020; 368. (6497): 7005. DOI: 10.1126/science.aaz7005. №24.
19. Lebedev A.V. *Dinamicheskaya model' rosta sosnovykh drevostoyev yevropeyskoy chasti Rossii po dannym povtornykh nablyudeny* [Dynamic growth model of pine stands in the European part of Russia according to repeated observations] *Sibirskiy lesnoy zhurnal=Siberian Forest Journal*. 2024; 4: 72-83. (in Russ.) DOI: 10.15372/SJFS20240407.
20. Gerelbaatar S., Baatarbileg N., Battulga P., Batsaikhan G., Khishigjargal M., Batchuluun T., Alexander G. Which selective logging intensity is most suitable for the maintenance of soil properties and the promotion of natural regeneration in highly continental Scots pine forests – results 19 years after harvest operations in Mongolia. *J. For.* 2019; 10 (141): 21-22. DOI: 10.3390/f10020141.
21. Fletcher T. D. (2022). *Package 'QuantPsys'.* *Quantitative Psychology Tools*. Ver. 1.6. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/QuantPsys/QuantPsys.pdf>. Accessed on 12.10.2022
22. Hothorn T., Winell H, Hornik K, van de Wiel M. A., Zeileis A. (2023). *Package 'coin'.* *Conditional Inference Procedures in a Permutation Test Framework*. Ver. 1.4-3. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/coin/coin.pdf>.(Accessed on 26.09.2023)
23. van den Boogaart K. G., Tolosana-Delgado R., & Bren M. (2022). *Package 'composition'.* *Compositional data analysis*. Ver. 2.0-4. Available online: <https://cran.microsoft.com/web/packages/composition/composition.pdf>. (Accessed on 10.04.2022)
24. Team R Core (2024) *R: a language and environment for statistical computing*. R version 4.4.0 (2024–04–24). R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available online: [http:// www.r- proje ct. org](http://www.r-project.org).

Сведения об авторах

Грязькин Анатолий Васильевич- доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО С-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова пер. Институтский, 5, корпус У, г. Санкт-Петербург, 194018 Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7901-2180>, e-mail: lesovod@bk.ru.

Горбач Вячеслав Васильевич - доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185960, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2326-8539>, e-mail: gorbach@petsu.ru.

Естественные науки и лес

Феклистов Павел Александрович - доктор сельскохозяйственных наук, профессор. Северный арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова наб. Северной Двины, 17, САФУ, г. Архангельск, 162000 Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>, e-mail: pfeklistov@yandex.ru.

Климов Борис Борисович – аспирант, ФГБОУ ВО С-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова пер. Институтский, 5, корпус У, г. Санкт-Петербург, 194018 Российская Федерация, e-mail: klimov@bk.ru.

✉ *Гаврилова Ольга Ивановна* - доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185960, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>, e-mail: ogavril@mail.ru.

Information about the authors

Anatoly V. Gryazkin - Doctor of Biological Sciences, Professor, FSBEI HE St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirova lane Institutsky, 5, building U, St. Petersburg, 194018 Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3497-9312>, e-mail: lesovod@bk.ru.

Vyacheslav V. Gorbach - Doctor of Biological Sciences, associate professor, Petrozavodsk State University, 33 Lenin Ave., Petrozavodsk, 185960, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2326-8539>, e-mail: gorbach@petsu.ru.

Pavel A. Feklistov - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosova emb. Northern Dvina, 17, NArFU, Arkhangelsk, 162000 Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>, e-mail: pfeklistov@yandex.ru.

Boris B. Klimov, graduate student, FSBEI HE St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirova lane Institutsky, 5, building U, St. Petersburg, 194018 Russian Federation, e-mail: klimov@bk.ru.

✉ *Olga I. Gavrilova*, Doctor of Agricultural Sciences, Professor. Petrozavodsk State University, Lenin Ave., 33, Petrozavodsk, 185960, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5618-8239>, e-mail: ogavril@mail.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding



Запасы фитомассы подлесочных пород и их прирост в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины

Нелли П. Карташова✉, Kartashova_73@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>

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

Аннотация

Введение. Изучение запасов и годичной динамики фитомассы подлесочных пород в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины имеет важное значение для понимания вклада различных ярусных компонентов леса в углеродный цикл, особенно в условиях меняющегося климата.

Цель исследования. Оценить запасы фитомассы подлесочных пород и их ежегодный прирост в разных типах лесных экосистем указанного региона, а также определить их роль в накоплении и динамике углерода.

Материалы и методы. Исследования проведены на постоянных пробных площадях в двух типах лесных экосистем Воронежской области: (1) чистом сосновом древостое Левобережного лесничества и (2) смешанных лиственных насаждениях дуба черешчатого с примесью липы мелколистной, клёна остролистного и ясеня обыкновенного (Правобережное лесничество). Для каждого вида подлеска определяли видовую принадлежность, категорию состояния, структуру яруса, высоту, ширину, величины проективного покрытия и другие дендрометрические показатели. Запасы углерода в фитомассе рассчитывались таксационными методами. Годичная чистая первичная продукция (ЧПП) определялась по динамике запасов надземной биомассы.

Результаты. Установлено, что подлесок вносит существенный вклад в формирование запасов биомассы и накопление углерода в лесных экосистемах региона. Наибольшие значения годичного прироста фитомассы зарегистрированы в старовозрастных дубовых насаждениях в условиях свежей дубравы, что связано с повышенной продуктивностью под влиянием богатого слоя лесной подстилки и гумуса. В сосновых древостоях наблюдается меньший прирост и менее сложная структура подлеска.

Заключение. Полученные данные расширяют представления о структурно-функциональной организации подлеска в различных типах лесостепных экосистем и его роли в биогеохимическом цикле углерода. Результаты могут быть использованы для совершенствования систем мониторинга углерода и планирования адаптивного управления лесами с учётом климатических целей.

Ключевые слова: подлесок, фитомасса, запасы углерода, лесостепь, годичный прирост, постоянные пробные площадки, биологическая продуктивность, структура растительного сообщества.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)»

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Карташова Н.П. Запасы фитомассы подлесочных пород и их прирост в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины. / Н.П. Карташова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 29-46. – Библиогр.: с. 43-46 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/3>.

Поступила 23.02.2025. Пересмотрена 25.03.2025. Принята 5.06.2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.

Article

Reserves of phytomass of understory rocks and their growth in forest-steppe ecosystems of the Oka-Don Don plain

Nelli P. Kartashova✉, Kartashova_73@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>

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

Abstract

Introduction. The study of stocks and annual dynamics of phytomass of undergrowth species in forest ecosystems of the Oksko-Donskaya Plain is important for understanding the contribution of different tier forest components to the carbon cycle, especially under changing climate conditions.

Aim of the study is to estimate phytomass stocks of undergrowth species and their annual growth in different types of forest ecosystems of the specified region, as well as to determine their role in carbon accumulation and dynamics.

Materials and Methods. The studies were conducted on permanent sample plots in two types of forest ecosystems of the Voronezh Region: (1) pure pine stands of the Levoberezhnoye forest division and (2) mixed deciduous stands of pedunculate oak (*Quercus robur*) with admixture of small-leaved lime (*Tilia cordata*), sharp-leaved maple (*Acer platanoides*) and common ash (*Fraxinus excelsior*) (Pravoberezhnoye forest division). For each undergrowth species, species affiliation, condition category, understorey structure, height, width, projective cover values and other dendrometric parameters were determined. Carbon stocks in phytomass were calculated using taxation methods. Annual net primary production (NPP) was determined by the dynamics of aboveground biomass stocks.

Results. It was found that undergrowth makes a significant contribution to the formation of biomass stocks and carbon storage in forest ecosystems of the region. The highest values of annual phytomass growth were recorded in old-growth oak stands under fresh oak forest conditions, which is associated with increased productivity under the influence of a rich layer of forest litter and humus. In pine stands, lower growth and less complex undergrowth structure are observed.

Conclusion. The data expand the ideas about the structural and functional organisation of undergrowth in different types of forest-steppe ecosystems and its role in the biogeochemical carbon cycle. The results can be used to improve carbon monitoring systems and adaptive forest management planning with climate targets in mind.

Keywords: undergrowth, phytomass, carbon stocks, forest-steppe, annual growth, permanent sample plots, biological productivity, plant community structure

Funding: the study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000012-7 "Biogeochemical monitoring of the carbon cycle in natural and anthropogenic ecosystems of the Voronezh region under conditions of global climate change (FZUR-2023-0001)")

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

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

For citation: Kartashova N.P. (2025). Reserves of phytomass of understory rocks and their growth in forest-steppe ecosystems of the Oka-Don flatland. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 29-46 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/3>.

Received 23.02.2025. Revised 25.03.2025. Accepted 5.06.2025. Published online 26.06.2025.

Введение

Численные результаты многочисленных научных исследований убедительно свидетельствуют о значимой роли лесных экосистем в глобальном углеродном цикле [2]. В период с 2010 по 2019 год, по экспертным оценкам, сухопутные экосистемы ежегодно поглощали порядка 12,5 млрд тонн диоксида углерода, при этом наибольшая доля аккумулировалась именно в лесах [3,4]. Лесные массивы являются крупнейшими наземными резервуарами углерода [5]. Особенности биологического круговорота и длительный жизненный цикл основных лесообразующих пород, характерные для бореальных и умеренных широт России, способствуют значительному накоплению углерода не только в фитомассе, но и в лесной подстилке, гумусе почв и торфяниках [6]. Благодаря долговременному запасанию углерода, лесные экосистемы играют ключевую роль в смягчении последствий выбросов парниковых газов и противодействии климатическим изменениям на планете. Захват и хранение углерода — важнейшие экосистемные функции лесов. Следует отметить, что несмотря на возрастание концентрации углекислого газа в атмосфере за последнее столетие, этот процесс, к сожалению, не сопровождался соразмерным увеличением фитомассы растительности [1].

Глобальное потепление климата, обусловленное антропогенным воздействием на окружающую среду, способствовало существенному росту интереса к вопросам оценки углеродного цикла лесных экосистем. В настоящее время данный интерес выходит за пределы фундаментальных научных исследований и находит практическое воплощение в сфере лесопользования. В частности, формирование углеродных ферм и внедрение систем компенсации выбросов в лесном хозяйстве рассматриваются как перспективные направления устойчивого лесопользования, эффективных мер противодействия изменению климата и создания новых источников дохода [7].

Оценка запасов и потоков углерода в лесных экосистемах приобретает фундаментальное значение для глубокого понимания их вклада в процессы смягчения последствий изменения климата [8]. Достоверное количественное определение углеродного баланса лесов позволяет не

только уточнять масштабы их секвестрационного потенциала, но и разрабатывать эффективные стратегии управления для дальнейшего увеличения их компенсирующей роли. На протяжении последних десятилетий лесные экосистемы в глобальном масштабе сохраняют статус нетто-стока углерода, ежегодно поглощая от 3,6 до 7,6 Гт CO₂-эквивалента по разным оценкам, что составляет значительную долю антропогенных выбросов парниковых газов [9,10].

Около 45% мировых запасов углерода аккумулируется именно в лесных экосистемах. При этом углерод распределен между различными компонентами: основной его объем заключен в биомассе деревьев — стволах, ветвях, листьях и корневой системе, а также в подлеске, мертвой древесине и почвенном органическом веществе. Особое внимание уделяется оценке почвенного углерода и лесной подстилки, поскольку именно эти фракции характеризуются долговременным хранением и наибольшей устойчивостью к климатическим изменениям.

Комплексный анализ динамики углеродных запасов и потоков в лесах требует интеграции данных дистанционного зондирования, натурных инвентаризаций и моделей биогеохимических циклов. Такой подход позволяет выявлять пространственные и временные особенности накопления и высвобождения углерода, анализировать влияние природных и антропогенных факторов на углеродный баланс. В современных условиях результаты подобных исследований становятся важнейшей научной основой для разработки механизмов климатически адаптированного и устойчивого лесопользования.

Информация о динамике накопления, распределения и трансформации органического вещества в различных компонентах лесных фитоценозов — древесном, подлесочном, напочвенном покрове, лесной подстилке и почве — обладает фундаментальной значимостью для комплексной оценки роли лесных экосистем в глобальном углеродном цикле как на региональном, так и на мировом уровнях [11,12]. Анализ различных лесных формаций показывает, что вклад тропических, бореальных и умеренных лесов в глобальный углеродный баланс существенно различается ввиду контрастов климатических условий, особенностей

структуры, биомассы и продукционной специфики.

Тропические леса отличаются наивысшей первичной продуктивностью, интенсивными темпами накопления органического вещества, а также превосходящим другие типы лесов объёмом ежегодного поглощения углерода. В то же время бореальные лесные комплексы, несмотря на относительно низкие темпы прироста биомассы, играют критически важную роль в долговременной аккумуляции углерода за счёт большой площади распространения и значительных запасов органического вещества, в первую очередь — в почвах и напочвенном слое. Умеренные леса занимают промежуточное положение по запасам и продуктивности; рациональное и устойчивое управление ими способно существенно повысить их вклад в глобальные процессы секвестрации углекислого газа.

Для достоверной и всесторонней оценки вклада лесных экосистем в формирование углеродного цикла требуется учёт содержания и распределения углерода во всех основных компонентах экосистемы. Это включает древесную, подлесочную, травяную, напочвенно-подстилочную и почвенную фракции, каждая из которых участвует в процессах поглощения, депонирования и выделения углерода. Динамические характеристики потоков органического вещества между этими компонентами во многом определяют интегральную углеродную функцию леса.

Исследование структурно-динамических особенностей и продукционного потенциала древостоев и сопутствующих ярусов в различных типах лесных насаждений приобретает исключительно важное значение. Эти параметры выступают индикаторами адаптивных способностей лесных фитоценозов к изменяющимся абиотическим факторам среды, в том числе к росту температуры, изменению режима осадков и воздействию иных климатических стрессоров [13]. В свою очередь, результаты подобных исследований позволяют совершенствовать современные модели оценки биоразнообразия, стабильности и устойчивости лесных экосистем.

Следует подчеркнуть, что растительная фитомасса лесов – как в живой, так и в мёртвой органике – представляет собой весьма значимый, однако не доминирующий глобальный пул углерода.

Абсолютно преобладающими резервуарами остаются океанические системы и почвенные горизонты планеты, тем не менее роль лесов в глобальной регуляции содержимого атмосферного CO₂, поддержании биотического разнообразия и обеспечении биосферной стабильности трудно переоценить. Лесные экосистемы функционируют как эффективный биологический насос, связывая атмосферный углерод, и выступают стратегическим ресурсом для смягчения последствий климатических изменений.

Оценка запасов органической массы растений в лесных фитоценозах является одним из ключевых индикаторов, отражающих как общую продуктивность лесных экосистем, так и процессы их восстановления. Несмотря на важность этого направления исследований, в отечественной и зарубежной литературе преобладает внимание к фитомассе древесного яруса, в то время как сведения о запасах и динамике фитомассы подлеска представлены крайне фрагментарно [14-16]. В этой связи особенно актуальной задачей остаётся разработка методических подходов, позволяющих получать репрезентативные данные о запасах органического вещества нижних ярусов с оптимальным соотношением между простотой и точностью учёта, что необходимо как для научных, так и для практических целей оценки и освоения различных видов растений.

Одним из перспективных направлений является выявление количественных зависимостей между фитомассой подлеска и объективными таксационными показателями, такими как видовой состав и возраст древостоя, тип леса, бонитет и полнота насаждения. Нахождение подобных взаимосвязей позволит существенно упростить и стандартизировать процедуры оценки запасов подлеска в лесных фитоценозах различных типов.

Проблема определения текущего прироста фитомассы лесных насаждений, и особенно подлесочного яруса, относится к числу наиболее методически сложных и трудоёмких в современных лесозоологических исследованиях (Молчанов, Смирнов, 1967; Усольцев, 1998).

Целью данной работы является получение эмпирических данных о структуре надземной био-

массы и количественной оценке прироста подлесочных видов, произрастающих в лесостепных экосистемах Окско-Донской равнины.

Актуальность исследования определяется необходимостью пополнения современных баз данных по биологической продуктивности и фитомассе лесных фитоценозов, что имеет важное значение для анализа динамики лесных ресурсов, совершенствования прогнозных моделей продукционно-углеродного баланса и разработки эффективных природоохранных и лесохозяйственных мер.

Материалы и методы

Постоянные пробные площади (ППП) площадью 1 га были заложены на малонарушенных участках спелых и перестойных лесных насаждений возрастом 100–140 лет в следующих кварталах: № 60, выдел 2 (ППП № 3), № 76, выдел 6 (ППП № 15), № 59, выдел 5 (ППП № 16) (Левобережное участковое лесничество), а также в квартале № 47, выдел 3 (ППП № 6), квартале № 9, выдел 52 (ППП № 11), квартале № 35, выдел 6 (ППП № 12), квартале № 28, выдел 18 (ППП № 13), квартале № 34, выдел 11 (ППП № 14) на территории Правобережного лесничества в водоохранной зоне. В условиях лесополос Каменной степи (возраст насаждений – 120 лет) были также заложены постоянные пробные площади: ППП № 8 — площадью 0,25 га; ППП № 9 — 0,5 га; ППП № 10 — 0,5 га.

Пробные площади отличаются по типу лесорастительных условий и степени влажности почвы. В частности, ППП № 3 заложена в условиях свежей субори, ППП № 6 и № 14 — в условиях свежей судубравы, ППП № 11 — в условиях сухой дубравы, ППП № 12 и № 13 — в условиях свежей дубравы, ППП № 15 — в условиях свежего бора, ППП № 16 — в условиях влажной субори.

На каждой постоянной пробной площади были организованы учетные площадки размером 5×5 м, на которых осуществлялась регистрация всех видов подлесочных пород, измерялись высота и диаметр каждого экземпляра, определялось проективное покрытие и оценивалось жизненное состояние растений. В соответствии с результатами таксационных измерений для каждого вида древесных растений подлеска отбирались особи различной высоты, которые затем срезались у поверхности почвы для последующего определения массы ствола, ветвей и листьев. Подземная часть

(корни) извлекалась и обрабатывалась в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями [14–16]. Все фракции фитомассы взвешивали в сыром виде, далее отбирались контрольные образцы для определения влажности. Эти образцы высушивались в сушильных шкафах при температуре 105°C до постоянной массы [15]. Полученные значения использовались для перерасчёта массы всех фракций на абсолютно сухой вес.

Фитомасса является ключевым компонентом природного углеродного цикла, итогом продуцирования биогеоценоза и представляет собой органическую массу определенной структуры [11,12,16].

Для определения запасов фитомассы подлеска в исследуемых фитоценозах был применён метод модельных деревьев с последующим использованием аллометрических уравнений для оценки массы отдельных фракций древесных растений и общей фитомассы подлесочных пород [17–19].

Для перевода значений фитомассы древесного и её структурных фракций в запасы углерода использовались конверсионные коэффициенты, рекомендованные МГЭИК для лесов умеренной зоны: 0,48 для лиственных и 0,51 для хвойных пород [20].

Оценка биологической продуктивности древостоев по данным, полученным на постоянных пробных площадях, осуществлялась в соответствии с методикой, изложенной в работе А.И. Уткина с соавторами (2005) [21].

Ежегодный прирост подлесочных пород определяли методом анализа годичных приростных колец на модельных экземплярах, что позволило установить возраст каждого изучаемого растения. На основании полученных данных рассчитывали среднюю массу абсолютно сухого вещества (за исключением листьев) модельного экземпляра для каждой породной группы. Для вычисления среднегодового прироста древесины (ствол и ветви) индивидуального растения проводили деление общей массы на возраст выбранного экземпляра. Полученное значение, умноженное на численность данной породы на 1 га, позволяло оценить ежегодный прирост древесины соответствующей породы в пересчете на гектар.

Суммируя данные прироста по всем видам подлеска, определяли общий среднегодовой прирост древесины подлесочного яруса. Следует отметить, что подобная методика предусматривает усреднение темпов наращивания биомассы, не учитывая возрастную динамику роста; известно, что прирост подлесочных пород варьирует на различных стадиях их онтогенеза. Тем не менее, вложенная неточность мало сказывается на конечных результатах, учитывая относительно небольшую долю подлеска в общей фитомассе лесных насаждений по сравнению с древостоем.

Отсутствие единого стандарта оценки данного показателя предопределяет допустимый уровень погрешности в результатах. Согласно литературным данным, для научных исследований эта погрешность может составлять 5–19%, а при лесоустройственных работах и планировании рубок ухода — 10–20%, что позволяет признать выбранную методику удовлетворительно точной для решения поставленных исследовательских и прикладных задач.

Определение годичного прироста корневой массы в лесных фитоценозах представляет собой сложную исследовательскую задачу, поскольку извлечение полного объёма корневой системы, в особенности мелких и тонких корней, сопряжено с значительными методическими трудностями. Кроме того, в отличие от стволов древесных растений, корни не формируют выраженные годичные кольца прироста, что затрудняет проведение прямых дендрохронологических измерений и оценки ежегодного прироста их массы.

В связи с этим для количественной оценки прироста корней в исследуемых фитоценозах применялся косвенный (аллометрический) метод расчёта, основанный на определении процентных соотношений между массой основных фитомассных фракций (ствол, ветви, корни) в модельных экземплярах подлесочных пород. Расчёт осуществлялся по соответствующей формуле (1), предложенной В.А. Усольцевым (2002), где прирост массы корней определяется на основании эмпирически установленных удельных весовых коэффициентов, характеризующих распределение биомассы между надземными и подземными органами.

Данный подход базируется на предположении о стабильности аллометрических соотношений между основными компонентами древесных растений в течение жизненного цикла, что позволяет экстраполировать величину ежегодного прироста надземных фракций на соответствующий прирост корневой массы. Несмотря на определённые ограничения и возможную вариабельность удельных коэффициентов в зависимости от экологических условий и биологических особенностей видов, описанный метод широко используется в экологических исследованиях для интегральной оценки динамики подземной фитомассы лесных экосистем.

$$Z_r = Z_c \frac{R}{C} \quad (1)$$

где Z_r - прирост корней (в весовых единицах);
 Z_c - прирост стволов и ветвей (в весовых единицах);

R - доля корней от суммы весов ствола, ветвей и корней (в %);

C - доля ствола и ветвей от суммы ствола, ветвей и корней (в %).

Прирост стволов и ветвей древесных растений оценивается на основании результатов таксационных измерений, включающих определение диаметра на высоте груди и высоты каждого экземпляра. Это позволяет точно рассчитать наращивание объёма и массы надземных фракций подлесочных пород в динамике.

Доля корней (R) определяется как отношение массы корневой системы к суммарной массе дерева (стебель + ветви + корни), отражая вклад подземных органов в общую биомассу растения. Аналогично, доля ствола и ветвей (C) — это отношение совокупной массы ствола и ветвей к общей биомассе.

Расчёт прироста подземной биомассы (ZR) осуществляется по аллометрической формуле, согласно которой прирост корней пропорционален значению прироста надземной части (Z_c), скорректированному на структурное соотношение долей корней и надземных фракций в общей массе растения. Величина $Z_c \times R$ отражает ту часть прироста надземной биомассы, которая пропорционально отнесена к корневой системе и может быть учтена как прирост подземной массы, в то время как последующее деление на структурную долю надзем-

ных фракций (С) обеспечивает нормализацию данного значения относительно всей биомассы исследуемых экземпляров, а не только их надземной части.

Таким образом, подобный подход позволяет учесть реальное структурное соотношение между надземной и подземной массой при оценке динамики прироста корневой системы. Это особенно важно для адекватного моделирования биомассообразования и баланса углерода в лесных фитоценозах, поскольку позволяет минимизировать искажения, связанные с вариабельностью структуры древесной биомассы разных видов и возрастных состояний. Корректировка по соотношению долей обеспечивает более точную экстраполяцию прироста между органами, отражая структурно-функциональные особенности аллометрии древесных растений в лесных экосистемах.

Результаты

Оценка запасов фитомассы древесно-кустарниковой растительности открывает возможность более точно определить объем депонированного углерода в лесных экосистемах, что приобретает особую актуальность в контексте глобальных климатических изменений. Показатель углеродного депонирования служит одним из ключевых критериев при анализе вклада лесов в процессы секвестрации углекислого газа и смягчения неблагоприятных климатических последствий. Данный параметр чрезвычайно важен для обоснования стратегий устойчивого лесопользования, формирования политики по адаптации лесного хозяйства к изменяющимся условиям, а также для активного участия в международных и национальных программах по компенсации парниковых выбросов, например, при реализации углеродных рынков и климатических проектов.

Особое значение в механизмах накопления органического вещества имеет подлесок — компонент лесного фитоценоза, включающий кустарниковую и травянистую растительность. Его роль в секвестрационных процессах во многом определяется видовым составом, уровнем биологического разнообразия и структурными характеристиками, в частности, густотой насаждений. Видовое многообразие и пространственная неоднородность подлеска способствуют увеличению общего биомассового и углеродного резерва, а также ускоряют

процессы круговорота питательных веществ и восстановления нарушенных участков экосистемы.

Таким образом, регулярная и комплексная оценка фитомассы и связанного с ней депонирования углерода в древесно-кустарниковых ярусах леса является важнейшим элементом мониторинга состояния лесных экосистем и формирования научно обоснованных решений по управлению лесными ресурсами в условиях климатических вызовов современности.

Подлесочные породы, произрастающие на территории дубрав, имеют по большей части среднюю густоту. Видовой состав подлеска довольно разнообразен и представлен лещиной обыкновенной (*Corylus avellana* L.), бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosus* L.) и кленом полевым (*Acer campestre* L.). Данные породы произрастают на всей территории квартала 47, кроме выдела 9 (ольшаник) — там подлесок сформировали ильмовые и черемуха. Подлесок на территории сосновых насаждений встречается в кварталах 59, 60 и 76. В основном это рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), произрастающая редкими группами или отдельно растущими деревьями. Также встречается ирга круглолистная (*Amelanchier rotundifolia* L.) и малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.).

В таблице 1 представлены суммарные и фракционные запасы фитомассы подлеска. Наибольшие суммарные запасы фитомассы подлеска наблюдаем в условиях свежей дубравы (776,6 кг/га и 345,25 кг/га), наименьшие — в лесополосе №124 Каменной степи. Ведущая роль в накоплении фитомассы подлеска в условиях свежей дубравы принадлежит лещине обыкновенной (744,646 кг/га и 247,71 кг/га). Сравнивая полученные данные, можно отметить, что общая надземная фитомасса по сумме фракций (ствол, ветви, листья) в 3,4 раза превышает подземную фитомассу. Почти вся надземная фитомасса в исследуемых типах лесорастительных условий превышает подземную. Только в условиях свежей судубравы подземная фитомасса превышает в 1,6 раз надземную. Это связано с тем, что растения инвестируют больше ресурсов в развитие корневой системы, чем в развитие надземной части, также между растениями имеется конкуренция за воду и питательные вещества, что может стимулировать развитие корневой системы для более эффективного поглощения ресурсов в условиях свежей судубравы.

Естественные науки и лес

Таблица 1

Суммарные и фракционированные запасы фитомассы подлеска на пробных площадях Пригородного лесничества Воронежской области и лесополосах Каменной степи, кг/га

Table 1

Total and fractionated stocks of undergrowth phytomass in the trial areas of the Prigorodny Forestry District of the Voronezh Region and the forest belts of the Stone Steppe, kg/ha

№ППП /Тип леса PSP No/ type of forest	Виды растений Types of plants	Фракции фитомассы		Phytomass fractions			Всего Total
		Стволы и ветви Trunks and branches	Листья Leaves	Корни Roots	Надземная фитомасса Above-ground phytomass	Подземная фитомасса Below-ground phytomass	
8/лесополоса №76 Каменной степи 8/ forest belt №76 The Stone Steppe	Бересклет Beresklet	1,88	1,35	2,4	3,23	2,4	5,63
	Ирга круглолистная Round-leaved irga	9,11	0,72	1,55	9,83	1,55	11,38
	Клен татарский Tatar maple	22,2	8,4	58,0	30,6	58,0	88,6
	Черемуха Bird cherry	1,00	0,186	3,63	1,19	3,63	4,82
	Всего Total	34,19	10,65	65,58	44,85	65,58	110,43
9/лесополоса №124 Каменной степи 9/forest belt №124 The Stone Steppe	Бересклет Beresklet	5,37	0,29	0,526	5,66	0,526	6,186
	Клен полевой Field maple	0,648	0,086	0,0624	0,734	0,0624	0,7964
	Всего Total	6,018	0,376	0,5884	6,394	0,5884	6,98
10/лесополоса №45 Каменной степи 10/forest belt №76 The Stone Steppe	Бузина красная Red elderberry	0,136	0,064	0,64	0,2	0,64	0,84
	Бересклет Beresklet	0,794	0,089	0,896	0,883	0,896	1,779
	Клен ясенелистный Ash-leaved maple	87,11	19,11	40,56	106,22	40,56	146,78
	Всего Total	88,044	19,263	42,1	107,11	42,1	149,4
11/ D ₁	Бересклет Beresklet	2,23	0,768	2,84	2,996	2,84	5,836
	Рябина обыкновенная Common mountain ash	10,98	2,19	24,0	13,175	24,0	37,175
	Клен полевой Field maple	23,48	7,62	14,66	31,098	14,66	45,758
	Клен татарский Tatar maple	8,28	0,68	9,46	8,96	9,46	18,42
	Роза Rose	4,12	1,21	3,73	5,33	3,73	9,06
	Боярышник Hawthorn	100,0	6,55	31,77	106,55	31,77	138,32
	Всего Total	149,09	19,019	86,46	168,109	86,46	254,569
12/ D ₂	Лещина Hazel	443,55	130,6	170,5	574,146	170,5	744,646
	Клен полевой Field maple	9,78	3,72	12,0	13,5	12,0	25,5

Естественные науки и лес

	Бузина красная Red elderberry	0,027	0,013	0,02	0,04	0,02	0,06
	Бересклет Beresklet	3,343	0,39	3,02	3,733	3,02	6,75
	Всего Total	456,7	134,72	185,54	591,06	185,54	776,6
13/ D ₂	Лещина Hazel	120,76	24,25	102,7	145,01	102,7	247,71
	Клен полевой Field maple	33,17	8,43	25,1	41,6	25,1	66,7
	Бересклет Beresklet	12,72	3,72	14,4	16,44	14,4	30,84
	Всего Total	166,65	36,4	142,2	203,05	142,2	345,25
14/ C ₂ D	Бересклет Beresklet	10,7	1,85	3,48	12,55	3,48	16,03
	Бузина красная Red elderberry	0,38	0,22	0,51	0,6	0,51	1,11
	Лещина Hazel	24,61	5,08	67,55	29,69	67,55	97,24
	Всего Total	35,7	7,15	71,54	42,84	71,54	114,38
15/ A ₂	-	-	-	-	-	-	-
16/ B ₃	Ирга круглолистная Round-leaved irga	38,2	4,2	27,01	42,4	27,01	69,41
	Малина обыкновенная Ordinary raspberries	3,73	5,33	3,4	9,06	3,4	12,46
	Рябина обыкновенная Common mountain ash	57,0	2,92	33,94	59,91	33,94	93,85
	Всего Total	98,93	12,45	64,35	111,37	64,35	175,72

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Запас углерода был оценен в двух пулах: надземной и подземной фитомассе. Выявленные запасы углерода в растительности напрямую коррелируют с запасами её фитомассы.

Полученные результаты позволяют всесторонне оценить распределение запасов углерода между различными фракциями надземной и подземной фитомассы исследуемых лесных экосистем. Проведённые исследования показали, что максимальные значения запасов углерода фитомассы подлеска были зафиксированы в дубраве осоко-снытьевой (ППП №12) при средней густоте подлеска и составили 0,357 т/га. Это свидетельствует о высокой продуктивности и значительном вкладе подлеска в общий углеродный баланс именно в данном типе растительности. Также относительно высокие значения наблюдались в дубраве участка ППП №13, где запасы углерода подлеска достигли 0,172 т/га.

Вместе с тем минимальные значения были отмечены в лесополосе №124 (ППП №9) Каменной лесостепи, где запасы углерода фитомассы подлеска оказались существенно ниже и составили всего 0,0033 т/га. Такой низкий показатель может

быть обусловлен как особенностями местных экологических условий, так и составом растительных сообществ, густотой древесного и кустарникового ярусов, а также антропогенным воздействием на территорию.

В целом выявленные различия в запасах углерода подчеркивают значительное влияние типа лесной экосистемы, структуру ее насаждений, условий произрастания и характера формирования подлеска на процессы накопления и распределения углерода. Полученные данные могут быть использованы для дальнейших исследований углеродного баланса, оценки вклада подлеска в продукционные процессы, а также для выработки рекомендаций по сохранению и устойчивому управлению лесными экосистемами в условиях изменения климата.

Отметим достаточно выраженные различия в соотношении запасов углерода подземной фитомассы к запасам в надземной фитомассе (R:S) в дубраве на ППП №12 с преобладанием лещины обыкновенной в подлеске, которое значительно превышает единицу и составляет 4,7. По-видимому, в условиях, где конкуренция за почвенные

ресурсы среды является более острой, эта подлесочная порода формирует мощную корневую систему. Высокое значение R:S означает, что значительная часть углерода в этой дубраве депонирована под землей. Это делает экосистему более устойчивой к потерям углерода при пожарах или рубках, поскольку корни менее подвержены воздействию этих факторов. В дубраве на ППП №13 соотношение R:S уменьшается до 1,4. При этом на той и другой пробной площади наблюдается значительное преобладание углерода надземной фитомассы.

В сосновом насаждении на ППП №16 с преобладанием в подлеске рябины обыкновенной соотношение R:S составляет 1,73, что свидетельствует об адаптации растений к конкретным условиям, о балансе между надземной и подземной биомассой, который обусловлен достаточным количеством влаги и питательных веществ в почве,

оптимальным освещением и невысокой конкуренцией за ресурсы.

Существенное различие запасов углерода в фитомассе надземной и подземной части наблюдается в лесополосе №76 Каменной степи (ППП №10), где преобладающей подлесочной породой является клен ясенелистный (*Acer negundo L.*), а также имеется значительное количество бузины красной (*Sambucus racemosa L.*). Запас углерода в надземной части в 2,5 раз превышает запас углерода в подземной части. Наблюдаемое соотношение R:S является результатом взаимодействия антропогенных факторов и специфической адаптации произрастающих пород растений. Искусственное создание лесополос, выбор пород, агротехнические мероприятия и особенности землепользования могли усилить естественную тенденцию растений к формированию более развитой надземной части в условиях засушливого климата.

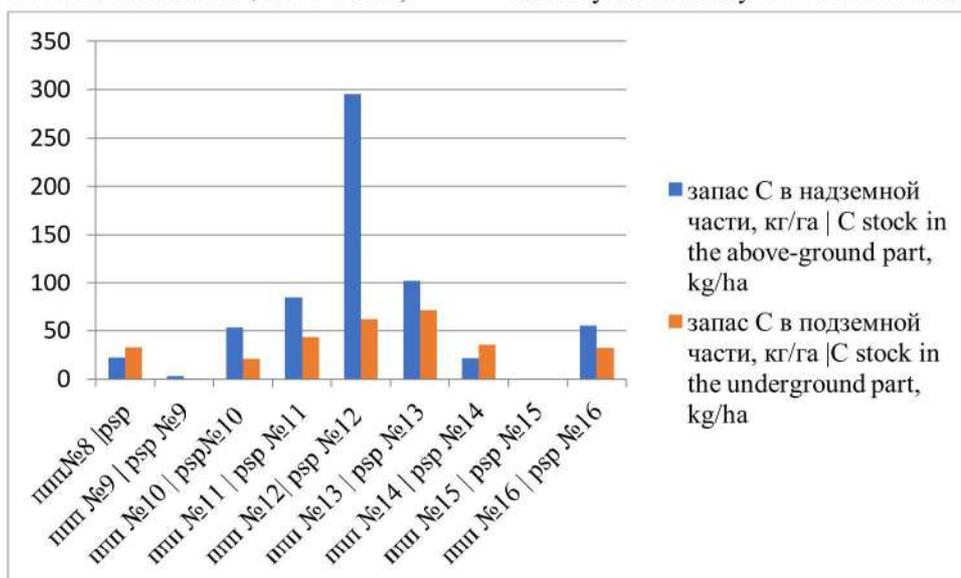


Рисунок 1. Гистограмма соотношения запасов углерода надземной и подземной частей подлеска на ППП

Figure 1. A histogram of the ratio of carbon reserves of the aboveground and underground parts of the undergrowth at the PSP

Источник: собственная композиция авторов
Source: the author's composition

Анализируя полученные данные, можно отметить, что по большинству площадок запасы углерода в надземной части существенно превышают таковые в подземной.

Например, на площадке "псп №12" фиксируется аномально высокий запас углерода в надземной части, достигающий почти 300 кг/га, в то время как содержание углерода в подземной части здесь относительно невелико и не превышает 50 кг/га. Вероятно, это

связано с особенностями видового состава, плотностью растительного покрова, либо спецификой хозяйственного использования данной территории. В целом, по остальным площадкам наблюдается более равномерное распределение запасов углерода между надземной и подземной частями, однако во всех случаях запасы надземного углерода превышают аналогичные показатели для подземной части. Только на площадках ППП №13 и ППП № 14 сопоставимы значения запасов С по обеим фракциям, что может указывать на большую роль корневых систем в формировании органического углерода на данных территориях. На ППП №15 подлесок отсутствует, поэтому там запас углерода не выражен.

Следовательно, результаты исследования демонстрируют значительную пространственную неоднородность распределения запасов углерода в различных частях растительности и указывают на определяющую роль особенностей почвенного, растительного покрова и антропогенного воздействия для аккумуляции органического углерода.

На основании данных, собранных на постоянных пробных площадях карбонового полигона, заложенных в различных типах лес-

ных экосистем, проведена оценка продуктивности подлесочных пород с использованием методики, предложенной А.И. Уткиным и соавторами (2005) 20. Результаты расчетов позволяют судить о характере распределения и величинах запасов углерода в фитомассе представителей подлеска, а также о динамике формирования надземной чистой первичной продукции. Суммарные значения первичной продукции представлены в пересчёте на килограммы углерода на 1 гектар площади, что даёт возможность сопоставлять продуктивность различных пород и пробных площадей.

В таблице 2 отражены запасы углерода в фитомассе подлесочных пород, а также значения надземной и подземной первичной продукции для каждого изученного объекта. Расчётные показатели фитомассы включают отдельные компоненты (стволы и ветви, листья, корни), что позволяет более детально анализировать структурные особенности углеродного баланса подлеска. Приведённые данные демонстрируют существенную разнородность распределения углерода между древесно-кустарниковыми породами, связанную как с экотипическими особенностями участков, так и с доминирующими видами растений.

Таблица 2

Прирост подлесочных пород на пробных площадях

Table 2

Growth of undergrowth in the test areas

№ППП /Тип леса PSP No/ type of forest	Виды растений Types of plants	Первичная продукция фитомассы, кг/га/год Primary production of phytomass, kg/ha/year					Всего Total
		Стволы и ветви Trunks and branches	Листья Leaves	Корни Roots	Надземная Above-ground	Подземная Below-ground	
3/ B ₂	Малина обыкновенная Ordinary raspberries	3,88	3,2	2,65	7,08	2,65	9,73
	Всего Total	3,88	3,2	2,65	7,08	2,65	
6/ C ₂ Д	Лещина Hazel	12,8	25,37	1,74	38,17	1,74	39,91

Естественные науки и лес

	Клен полевой Field maple	5,06	2,91	4,61	7,97	4,61	12,58
	Всего Total	17,86	28,28	6,35	46,14	6,35	52,49
8/лесополоса №76 Каменной степи 8/ forest belt №76 The Stone Steppe	Бересклет Beresklet	0,613	1,33	0,826	1,94	0,826	2,7
	Ирга круглолистная Round-leaved irga	2,56	0,69	0,384	3,25	0,384	3,63
	Клен татарский Tatar maple	7,4	8,4	19,6	15,8	19,6	35,4
	Черемуха Bird cherry	0,25	0,186	0,906	0,43	0,906	1,34
	Всего Total	10,82	10,606	21,716	21,15	21,716	42,87
9/лесополоса №124 Каменной степи 9/forest belt №124 The Stone Steppe	Клен полевой Field maple	0,324	0,086	0,504	0,41	0,504	0,914
	Бересклет Beresklet	2,68	0,29	0,242	2,96	0,242	3,21
	Всего Total	3,01	0,376	0,746	3,37	0,746	4,124
10/лесополоса №45 Каменной степи 10/forest belt №76 The Stone Steppe	Бузина красная Red elderberry	0,4	0,064	1,92	0,104	1,92	2,024
	Бересклет Beresklet	0,256	0,0896	0,288	0,346	0,288	0,634
	Клен ясенелистный Ash-leaved maple	17,23	19,11	8,16	36,34	8,16	44,5
	Всего Total	17,886	19,26	10,368	36,79	10,368	47,16
11/ D ₁	Бересклет Beresklet	0,70	0,768	0,93	1,47	0,93	2,4
	Рябина обыкновенная Common mountain ash	21,11	2,19	16,88	23,3	16,88	40,18
	Клен полевой Field maple	1,17	7,62	0,73	8,79	0,73	9,52
	Клен татарский Tatar maple	1,58	0,68	1,77	2,26	1,77	4,03
	Роза Rose	0,746	1,21	0,728	1,95	0,728	2,68
	Боярышник Hawthorn	9,24	6,55	3,12	15,79	3,12	18,91
	Всего Total	34,55	19,02	24,16	53,56	24,16	77,72
12/ D ₂	Лещина Hazel	49,24	130,6	18,67	179,84	18,67	198,51
	Клен полевой Field maple	3,48	3,72	3,04	7,2	3,04	10,24
	Бузина красная Red elderberry	0,04	0,013	0,053	0,053	0,053	0,106
	Бересклет Beresklet	0,835	0,39	0,752	1,22	0,752	1,97
	Всего Total	53,6	134,72	22,51	188,32	22,51	210,83

Естественные науки и лес

13/ D ₂	Лещина Hazel	30,18	24,25	25,61	54,43	25,61	80,04
	Клен полевой Field maple	8,85	8,43	6,24	17,28	6,24	23,52
	Бересклет Beresklet	3,6	3,72	4,46	7,32	4,46	11,78
	Всего Total	42,63	36,4	36,31	79,03	36,31	115,34
14/ C ₂ D	Бересклет Beresklet	2,09	1,85	1,71	3,94	1,71	5,65
	Бузина крас- ная Red elderberry	0,188	0,22	0,255	0,408	0,255	0,663
	Лещина Hazel	4,92	5,08	13,44	10,0	13,44	23,44
	Всего Total	7,198	7,15	15,405	24,35	15,405	29,75
15/ A ₂	-	-	-	-	-	-	-
16/ B ₃	Ирга кругло- листная Round-leaved irga	10,88	4,2	7,72	15,08	7,72	22,8
	Малина обык- новенная Ordinary raspberries	1,86	5,33	1,69	1,16	1,69	8,88
	Рябина обык- новенная Common mountain ash	19,43	2,92	11,44	22,36	11,44	33,8
	Всего Total	32,17	12,45	20,85	32,17	20,85	53,02

В результате исследования, проведенного на постоянных пробных площадях различных типов лесных экосистем и лесополос Каменной степи, были выявлены существенные отличия в приросте фитомассы и запасах углерода среди подлесочных пород.

Наиболее высокие показатели надземной первичной продукции зафиксированы для лещины (*Corylus avellana*) на площадке №12 (D₂, дубрава осоко-снытьевая), где значение составило 179,84 кг/га/год, а общий запас углерода, с учетом подземной (корневой) биомассы, достигает 198,51 кг/га/год. Существенным вкладом также характеризуется лещина на площадке №13 (D₂) – 54,43 кг/га/год (надземная биомасса) и суммарно 80,04 кг/га/год. Для сравнения, клен полевой (*Acer campestre*) на этих же участках демонстрирует меньшие значения: 7,2 кг/га/год (надземная часть) и 10,24 кг/га/год (суммарно) на площадке №12, и 17,28 кг/га/год и 23,52 кг/га/год — на площадке №13 соответственно.

Рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), представлена высокими значениями на площадке №11 (D₁) – 23,3 кг/га/год по надземной фитомассе и 40,18 кг/га/год по суммарному запасу углерода. Аналогично, значительный вклад даёт клен ясенелистный (*Acer negundo*) в лесополосе №45 (ППП №10, Каменная степь) – 36,34 кг/га/год надземной продукции и 44,5 кг/га/год суммарной фитомассы.

В лесополосах Каменной степи (участки 8, 9, 10), концентрация запасов углерода в подлеске существенно ниже. Так, на площадке №9 (лесополоса №124) суммарные значения для всех видов составляют лишь 3,37 кг/га/год по надземной продукции и 4,124 кг/га/год по суммарной фитомассе. На ближайшей к нему площадке №8 (лесополоса №76), наиболее продуктивный вид — клен татарский (*Acer tataricum*), вносит вклад в 15,8 кг/га/год надземной продукции (35,4 кг/га/год суммарно), однако по другим видам значения существенно ниже (например, бересклет — 1,94 и 2,7 кг/га/год соответственно).

В среднем по всем исследуемым площадкам надземная часть фитомассы (стволы, ветви, листья) вносит больший вклад в общий запас углерода по сравнению с подземной. Например, для подлеска участка №11 (D1) надземный запас составил 53,56 кг/га/год, а подземный — 24,16 кг/га/год. В лесополосах, где подлесок менее развит, соотношение надземной и подземной фитомассы выравнивается (например, на №9: 3,37 и 0,746 кг/га/год соответственно).

Анализ распределения углерода между древесными компонентами показывает, что наибольший вклад обеспечивают стволы и ветви. Так, лещина на участке №12 формирует 49,24 кг/га/год углерода в стволах и 130,6 кг/га/год — в ветвях, что в совокупности составляет более 90% всего годового прироста фитомассы этого вида на данной площадке. Напротив, листья и корни суммарно на большинстве объектов формируют менее 15% общего прироста.

По видам, наименее продуктивными оказались такие представители, как бересклет (*Euonymus*) на площадке №9 - с 2,96 кг/га/год по надземной части и 3,21 кг/га/год — суммарно, а также бузина красная (*Sambucus racemosa*) на площадке №10 (0,104 и 2,024 кг/га/год соответственно).

В целом, выявленные различия в показателях прироста подлеска обусловлены как видовыми особенностями, так и типом экосистемы и условиями местообитаний. Естественные дубравы (участки 12, 13) и участки с развитым древесно-кустарниковым ярусом характеризуются наибольшим запасом углерода в подлеске и, соответственно, более высокой первичной продуктивностью.

Таким образом, максимальные значения запасов углерода и первичной продукции подлесочных пород характерны для лещины, кленов и рябины на участках с наибольшей сомкнутостью и видовым разнообразием подлеска (до 198,5 кг/га/год — лещина, участок №12). Минимальные показатели отмечены для лесополос, где суммарная продукция подлеска не превышает 4,1 кг/га/год. Полученные данные свидетельствуют о значимой роли состава подлесочных пород и типа лесной экосистемы в формировании углеродного баланса исследуемых территорий.

Таким образом, можно сделать вывод, что во всех исследуемых лесорастительных условиях прирост надземной фитомассы превышает прирост подземной. Исключение составила ППП №8, заложенная в лесополосе Каменной степи, где оба эти показателя равны, что связано с условиями существования фитоценоза (недостаток влаги, высокие летние температуры). Наибольшая первичная продукция подлесочных пород наблюдается в насаждениях дуба в возрасте более 100 лет в условиях свежей дубравы. Это связано тем, что естественный процесс старения у дубовых насаждений приводит к выпадению части деревьев, усыханию ветвей и, как следствие, появлению окон в пологе, что увеличивает количество света, достигающего нижних ярусов. В результате, подлесочные породы получают больше энергии для фотосинтеза и, следовательно, для производства биомассы.

Выводы

1. Проведённая оценка фракционированных запасов фитомассы подлеска на постоянных пробных площадях карбонового полигона позволяет утверждать, что данный показатель играет значимую роль в определении продуктивности лесных экосистем исследуемого региона. Установлено, что запасы фитомассы на площадках 8, 9 и 10 (Каменная степь, лесополосы №76, 124, 45) колеблются в пределах 0,0069–0,149 т/га, что обусловлено различиями в плотности подлеска. В частности, на пробной площадке №8 при низкой плотности подлеска (800 экз./га) наблюдается минимальный запас фитомассы (0,0069 т/га). Максимальные значения фитомассы зарегистрированы на площадке №10, что связано с доминированием клена ясенелистного (*Acer negundo*), отличающегося пластичностью, быстрым ростом и высокой репродуктивной способностью. В свежей дубраве (ППП №12) зафиксированы наиболее высокие запасы фитомассы (0,777 т/га), при этом вклад лещины обыкновенной (*Corylus avellana*) составляет 0,744 т/га за счёт её высокой экологической пластичности.

2. В результате исследования запасов углерода в фитомассе подлесочных пород на постоянных пробных площадях полигона получены новые

данные, раскрывающие структурно-функциональную организацию лесных сообществ Воронежской области. Максимальные запасы углерода выявлены в дубраве осоко-снытьевского типа (ППП №12) при средней плотности подлеска и составляют 0,357 т/га, аналогичный показатель на ППП №13 достигает 0,172 т/га. Высокие значения углеродных запасов обусловлены совокупностью благоприятных почвенно-климатических условий дубрав, оптимальной плотностью подлеска и присутствием наиболее продуктивных видов. Минимальные запасы углерода отмечены в лесополосе №124 (ППП №9) Каменной степи — 0,0033 т/га, что связано с ограниченным количеством осадков, высокими температурами летом, низким плодородием почв, особенностями формирования лесополос и интенсивной конкуренцией между древостоем и подлеском.

3. Проведённое исследование позволило оценить соотношение запасов углерода между фракциями надземной и подземной фитомассы подлеска. Полученные данные могут быть использованы для формирования регионализированной базы данных углеродных запасов в лесных экосистемах и обоснования природоохранных и лесохозяйственных мероприятий.

4. Анализ соотношения подземной и надземной фитомассы подлесочных пород (индекс R:S) выявил значительные различия в зависимости от типа лесорастительных условий, специфик биологии и экологии видов, структуры насаждений и степени конкуренции за почвенные ресурсы. В пригородных лесничествах показатель R:S варьи-

рует от 0,4 до 4,7, достигая максимальных значений у лещины обыкновенной (R:S = 4,7) благодаря мощной корневой системе. В лесополосах Каменной степи соотношение составляет 0,09–1,57 и определяется особенностями почвенного покрова и сомкнутостью полога. Установленная вариативность R:S отражает влияние возраста растений, условий местообитания и антропогенной нагрузки: у молодых особей подлеска R:S выше, что обусловлено необходимостью приоритетного развития корневой системы на ранних стадиях онтогенеза для оптимального усвоения ресурсов.

5. Представленные результаты обладают высокой прикладной значимостью для организации мониторинга и комплексной оценки продуктивности лесных экосистем в различных климатических и почвенных условиях. Полученные данные могут служить научной основой при разработке и реализации лесохозяйственных мероприятий, направленных на поддержание и повышение продуктивности и устойчивости лесных насаждений.

6. Информация о приросте подлесочных пород имеет ключевое значение для количественной оценки углеродного баланса лесостепных экосистем. Детализированные данные о ежегодном приросте и видовом вкладе подлесочных растений позволяют более точно учитывать их роль в процессах секвестрации углерода, что приобретает особую актуальность в условиях глобальных изменений климата, а также при реализации мероприятий по устойчивому управлению лесными ресурсами.

Список литературы

1. Валентики Р., Замолотчиков Д., Рейер К., Ноги С., Сантини М., Линднер М. Изменение климата в России: прошлое, настоящее и будущее / Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука. -2020. -№ 11. -С. 45-52. <https://doi.org/10.36333/wsctu11>
2. Xu L., Saatchi S.S., Yang Y., Yu Y., Pongratz J., Bloom A.A., et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Sci Adv.* 2021; 7: eabe9829. - DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>.
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Hauck J., Olsen A. et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data.* 2020; 12(4): 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
4. Tagesson T., Guy S., Horion S., Ciais P., Tian F., Brandt M. et al. Recent divergence in the contributions of tropical and boreal forests to the terrestrial carbon sink. *Nature Ecology & Evolution*, 2020; 4(2): 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1090-0>

5. Mo L., Zohner C.M., Reich P.B., Liang J., De Miguel S., Nabuurs G.-J., et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*. 2023; 624: 92-101. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>.
6. Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н., Золина Т.А. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // *Лесной вестник*. - 2017. -Т. 21. - № 1. С. 4-13. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13
7. Морковина С. С., Панявина Е. А., Шанин И. И., Авдеева И. А. Экономические аспекты организации карбоновых ферм на лесных землях // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. – 2021. – № 1 (52). – С. 17-25. DOI: 10.34220/2308-8877-2021-9-1-17-25
8. Anderson-Teixeira K.J., Herrmann V., Banbury Morgan R., Bond-Lamberty B., Cook-Patton S.C., Ferson A.E. et al. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environ Res Lett*. 2021; 16: 053009. -DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>.
9. Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A., De Bruin S., Farina M. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat Clim Chang*. 2021; 11: 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
10. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J., Kauppi P.E. et al. The enduring world forest carbon sink. *Nature*. 2024; 631: 563-569. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>.
11. Zeller L., Pretzsch H. Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity. *Forest Ecology and Management*. 2019; 434: 193-204.- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.024>.
12. Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. *New Phytologist*. 2011; 190: 977-989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>.
13. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges. *Ecological Indicators*. 2019; 98: 665-677. -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.017>.
14. Закамская Е. С., Закамский А. В. Фитомасса подлеска в березняках // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2016. – № 9 (51). – С. 6–9. -DOI 10.18454/IRJ.2016.51.108.
15. Трофимова, И. Л. Надземная фитомасса и ее годичная продукция в спелых сосняках Среднего Урала: специальность 06.03.02. «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: дис. ... канд. с.-х. наук / Ия Леонидовна Трофимова. – Екатеринбург, 2015. – 249 с.
16. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения; УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 636 с. – ISBN 978-5-7691-2122-7.
17. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Comparing of allometric models of single-tree biomass intended for airborne laser sensing and terrestrial taxation of carbon pool in the forests of Eurasia. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32: e12187. -DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12187>.
18. Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С. Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях // *Изв. вузов. Лесн. журн*. 2023. № 1. - С. 65–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>
19. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Уразова А. Ф., Борников А. В. Биомасса подлесочных видов Урала и ее аллометрические модели // *Леса России и хоз-во в них*. -2023. -№1 (84). -С. 30–40. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12117>
20. Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов // *Лесоведение*. – 1997. – № 5. – С. 51-65. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857>
21. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Я.И., Гульбе Т.А., Милова О.В. Зависимые от фитомассы предикторы надземной части первичной продукции насаждений основных лесобразующих пород России//*Сибирский Экологический Журнал*. - 2005. - № 12. – С.707–715. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857>.

References

1. Valentiki R., Zamolodchikov D., Reyer K., Nogi S., Santini M., Lindner M. *Izmenenie klimata v Rossii: proshloe, nastojashhee i budushhee / Lesa Rossii i izmenenie klimata. Chto nam mozhet skazat' nauka* [Climate change in Russia: past, present and future. Forest of Russia and climate change. What can science tell us]. 2020; 11:45-52 (In Russ.) ISSN 2342-9526. <https://doi.org/10.36333/wscu11>
2. Xu L., Saatchi S.S., Yang Y., Yu Y., Pongratz J., Bloom A.A., et al. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Sci Adv.* 2021; 7: eabe9829. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>.
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Hauck J., Olsen A. et al. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data.* 2020; 12(4): 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
4. Tagesson T., Guy S., Horion S., Ciais P., Tian F., Brandt M. et al. Recent divergence in the contributions of tropical and boreal forests to the terrestrial carbon sink. *Nature Ecology & Evolution*, 2020; 4(2): 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1090-0>
5. Mo L., Zohner C.M., Reich P.B., Liang J., De Miguel S., Nabuurs G.-J., et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature.* 2023; 624: 92-101. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>.
6. Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N., Zolina T.A. *Metody ocenki balansa ugleroda v lesnyh jekosistemah i vozmozhnosti ih ispol'zovaniya dlja raschetov godichnogo deponirovaniya ugleroda* [Methods for assessing carbon balance in forest ecosystems and the possibility of their use for calculating annual carbon deposition] *Lesnoj vestnik= Forest Bulletin.* 2017; 21 (1): 4-13. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13 (In Russ.)
7. Morkovina S. S., Ponyavina E. A., Shanin I. I., Avdeeva I. A. *Jekonomicheskie aspekty organizacii karbonovyh ferm na lesnyh zemljah* [Economic aspects of the organization of carbon farms on forest lands]. *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika=Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice.* 2021;1 (52):17-25. DOI: 10.34220/2308-8877-2021-9-1-17-25 (In Russ.)
8. Anderson-Teixeira K.J., Herrmann V., Banbury Morgan R., Bond-Lamberty B., Cook-Patton S.C., Ferson A.E. et al. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environ Res Lett.* 2021; 16: 053009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>.
9. Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A., De Bruin S., Farina M. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat Clim Chang.* 2021; 11: 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
10. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J., Kauppi P.E. et al. The enduring world forest carbon sink. *Nature.* 2024; 631: 563-569. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>.
11. Zeller L., Pretzsch H. Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity. *Forest Ecology and Management.* 2019; 434: 193-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.024>.
12. Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. *New Phytologist.* 2011; 190: 977-989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>.
13. Forest stand structure and functioning: Current knowledge and future challenges. *Ecological Indicators.* 2019; 98: 665-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.017>.
14. Zakamskaja E.S., Zakamskij A.V. *Fitomassa podleska v bereznjakah* [Phytomass of undergrowth in birch forests]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal =International Research Journal.* 2016; 9 (51):6-9. doi: 10.18454. (In Russ.)
15. Trofimova I.L. *Nadzemnaja fitomassa i ee godichnaja produkcija v spelyh sosnjakah Srednego Urala.* Dis. kand. s.-h. nauk [Elevated phytomass and its annual production in ripe pine forests of the Middle Urals: PhD thesis]. Ekaterinburg, 2015. 249 p. (In Russ.)
16. Usol'cev V.A. *Biological productivity of forests of Northern Eurasia: methods, database and its applications.* Ekaterinburg: UrO RAN, 2007. 636 p. ISBN 978-5-7691-2122-7. (In Russ.)

17. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Comparing of allometric models of single-tree biomass intended for airborne laser sensing and terrestrial taxation of carbon pool in the forests of Eurasia. *Natural Resource Modeling*. 2019; 32: e12187. DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12187>.

18. Danilov D.A., Yakovlev A.A., Suvorov S.A., Krylov I.A., Korchagov S.A., Khamitov R.S. *Formirovanie nadzemnoj fitomassy listvennyh drevesnyh porod na postagrogennyh zemljah* [Formation of aboveground phytomass of deciduous tree species on postagrogenic lands]. *Izv. vuzov. Lesn. Zhurnal = Izvestiya vuzov Lesnoy zhurnal*. 2023; 1: 65-76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>(In Russ.)

19. Usoltsev V.A., Tsepordey I. S., Urazova A. F., Bornikov A. V. Biomassa podlesochnykh vidov Urala i ee allometricheskie modeli [Biomass of undergrowth species of the Urals and its allometric models]. *Lesy Rossii i khoz-vo v nikh = Forests of Russia and their Economy*. 2023; 1(84): 30-40. <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12117> (In Russ.)

20. Utkin A. I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N. *Opredelenie zapasov ugleroda nasazhdenij na probnyh ploshhadjah: sravnenie allometricheskogo i konversionno-obemnogo metodov* [Determination of carbon reserves of plantings on trial areas: comparison of allometric and conversion-volumetric methods]. *Lesovedenie = Forestry science*. 1997; 5: 51-65. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857> (In Russ.)

21. Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be Ya.I., Gul'be T.A., Milova O.V. *Zavisimye ot fitomassy prediktory nadzemnoj chasti pervichnoy produkcii nasazhdenij osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii* [Phytomass-Dependent Predictors of Above-Ground Net Primary Production of Plantations of the Main Forest-Forming Species of Russia]. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal = Siberian Journal of Ecology*. 2005; 12: 707-715. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9130857>.

Сведения об авторе

✉ *Карташова Нелли Павловна* - кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>, e-mail: Kartashova_73@mail.ru

Information about the author

✉ *Nelli P. Kartashova* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Forest Crops, Departments of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2535-9557>, e-mail: Kartashova_73@mail.ru

✉ - Для контактов/Corresponding



Опыт первичной акклиматизации посадочного материала *in vitro* *Betula pendula var. Dalecarlica* в условиях г. Архангельска

Алина А. Крайнова ✉, alinakrajnova@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1974-634X>

Александр М. Антонов, a.antonov@narfu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7076-233X>

Ольга П. Лебедева, o.lebedeva@narfu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

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

Аннотация

Статья освещает опыт адаптации к природным условиям северного региона посадочного материала *Betula pendula var. Dalecarlica*, который был получен лабораторным микроразмножением и транспортирован к месту проведения эксперимента. Береза далекарлийская известна своими декоративными свойствами и устойчивостью к среде произрастания, поэтому имеет высокий потенциал для использования в озеленении северных городов. Растения, культивированные методом *in vitro*, обеспечивают генетическую однородность и высокое качество посадочного материала. Для минимизации стресса после перевозки и подготовки саженцев к естественным условиям все растения на некоторое время помещались в микроклимат гидропонной установки. Затем для проведения акклиматизации, посадочный материал разделили по условиям произрастания на три равные части: часть осталась в гидропонике, остальные были перенесены в теплицу и открытый грунт. Во всех условиях опыта использовался одинаковый субстрат. В течение 40 дней проводился мониторинг таких основных морфометрических параметров роста и развития растений, как высота стволика, количество листьев и количество междоузлий. Наибольшие показатели отмечались у растений, которые пребывали в условиях гидропонной установки. Другие среды акклиматизации сыграли дополнительным стрессовым фактором для растений. Проведенные исследования продемонстрировали, что оптимальные условия адаптации способствуют более эффективному развитию растений. Результаты данного опыта могут быть полезны для улучшения практик по приспособлению посадочного материала к *ex-vitro* условиям регионов с суровым климатом с целью повышения биоразнообразия и эффективности культивирования растений, а также для разработки методик по улучшению выживаемости и развития культур, полученных *in vitro*.

Ключевые слова: посадочный материал *in vitro*, транспортировка, адаптация *ex-vitro*, *Betula pendula var. Dalecarlica*.

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: Крайнова, А. А. Опыт первичной акклиматизации посадочного материала *in vitro* *Betula pendula var. Dalecarlica* в условиях г. Архангельска / А. А. Крайнова, А. М. Антонов, О. П. Лебедева // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 47-63. – Библиогр.: с. 59-62 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/4>

Поступила 05. 02.2025. *Пересмотрена* 07.03. 2025. *Принята* 26.05.2025. *Опубликована онлайн*
26.06.2025.

Article

Experience of primary acclimatization of planting material *in vitro* *Betula pendula* var. *Dalecarlica* in the conditions of Arkhangelsk

Alina A. Krainova ✉, alinakrajnova@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1974-634X>

Aleksander M. Antonov, a.antonov@narfu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7076-233X>

Olga P. Lebedeva, o.lebedeva@narfu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5282-4904>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

The article covers the experience of adaptation to natural conditions of the northern region of planting material *Betula pendula* var. *Dalecarlica*, which was obtained by laboratory micropropagation and transported to the place of the experiment. Dalecarlica birch is known for its decorative properties and resistance to the growing environment, so it has a high potential for use in landscaping northern cities. Plants cultivated *in vitro* provide genetic homogeneity and high quality of planting material. To minimize stress after transportation and preparation of seedlings for natural conditions, all plants were placed in the microclimate of a hydroponic installation for some time. Then, for acclimatization, the planting material was divided into three equal parts according to growing conditions: some remained in hydroponics, the rest were transferred to a greenhouse and open ground. The same substrate was used in all experimental conditions. For 40 days, monitoring of such basic morphometric parameters of plant growth and development as stem height, number of leaves and number of internodes was carried out. The highest indicators were observed in seedlings that were kept in hydroponic conditions. Other acclimatization environments played an additional stress factor for plants. The conducted studies demonstrated that optimal adaptation conditions contribute to more effective plant development. The results of this experiment can be useful for improving practices for adapting planting material to *ex-vitro* conditions of regions with a harsh climate in order to increase biodiversity and efficiency of plant cultivation, as well as for developing methods for improving the survival and development of cultures obtained *in vitro*.

Keywords: *planting material in vitro, transportation, adaptation, Dalecarlica birch, introduced species.*

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 interests.

For citation: Krainova A. A., Antonov A. M., Lebedeva O. P. (2025). Experience of primary acclimatization of planting material *in vitro* *Betula pendula* var. *Dalecarlica* in the conditions of Arkhangelsk. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 47-63 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/4>.

Received 05. 02.2025. *Revised* 07.03. 2025. *Accepted* 26.05. 2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Использование новых видов растений для озеленения городской среды является неотъемлемой частью развития ее инфраструктуры и обуславливается проблемами деградации экосистемы города, снижением устойчивости зелёных насаждений и последствиями изменяющегося климата. Чрезмерная застройка приводит к утрате экосистем, однотипность растений делает их уязвимыми к болезням, а изменения климата требуют новых и устойчивых видов.

Повышение разнообразия посадочного материала может осуществляться за счет использования видов, способных произрастать в малоблагоприятных условиях города. К таким условиям относятся загрязнённый воздух, характеризующийся высоким уровнем токсичных веществ, низкая освещённость, наблюдающаяся в условиях плотной застройки, а также бедный питательными веществами состав почвы. Выбор видов, адаптированных к этим факторам, способствует созданию более устойчивой городской экосистемы. Использование растений *in vitro* для данных целей позволит получать такие виды и может стать ключом к развитию и улучшению качества зеленой инфраструктуры.

Betula pendula var. Dalecarlica или береза далекарлийская является разновидностью березы повислой и отличается перисто-рассеченной формой листа, благодаря которой представляет собой ценный вид для декоративного озеленения [1].

Феногенетическая изменчивость листьев является не только особенностью березы далекарлийской, но и играет важную роль в приспособлении к среде обитания. Рассеченные листовые пластинки в меньшей степени испытывают механическое повреждение от ветра, уменьшают площадь листа, облегчают теплообмен, снижают транспирацию, что способствует сохранению водного гомеостаза и адаптации к экологическому стрессу [2, 3].

Кроме того, данное дерево отличается высокой устойчивостью к загрязнению атмосферы, способно адаптироваться к низким температурам и неприхотливо к почвам [1, 4-7], что делает данный вид пригодным для интеграции в городскую среду.

Берёза далекарлийская уже прижилась в таких регионах с малоблагоприятным климатом, как

Мурманская область, Карелия и северные районы Ленинградской области. В этих местах её используют для озеленения городских парков, скверов и улиц, что помогает создать зелёные пространства для отдыха. Например, в Петрозаводске и Мурманске берёзу высаживают в общественных зонах, где она не только украшает ландшафт, но и служит экосистемной опорой, способствуя улучшению городской экологии. Кроме того, её активно используют в частных садоводствах и придомовых территориях, где холодостойкость и неприхотливость растения позволяют успешно адаптироваться к суровому климату.

Березу далекарлийскую чаще всего размножают вегетативно, преимущественно прививкой, однако это может привести к появлению потомства с цельными листьями из-за рецессивного характера признака [8, 9]. Поэтому традиционные методы размножения не обеспечивают необходимую генетическую однородность и жизнеспособность растений для качественного озеленения в отличие от клонального микроразмножения, которое позволяет полностью сохранить ценные характеристики исходного дерева. Это подтверждают и исследования по микроразмножению березы далекарлийской [10-12].

Кроме того, гены, играющие роль в регуляции развития и усложнения структуры листа, являются эволюционно древними и консервативными [13]. Состояние генов может стабильно наследоваться в клеточных поколениях и неограниченно долго сохраняться при вегетативном размножении [14]. Причем, индуцированное условиями культивирования *in vitro* эпигенетическое молчание достаточно стабильно и долговременно передается по клеточным поколениям в процессе клонального микроразмножения и наблюдается на протяжении 16-19 лет такого культивирования, а также сохраняется после высадки микрорастений в условия *ex vitro* [8]. Кроме того, в зависимости от используемого метода размножения, количество поколений, необходимых для закрепления признака рассеченности листа, варьируется: при традиционных методах требуется 3-5 поколений, в то время как *in vitro* позволяет достичь желаемых признаков значительно быстрее – за 1-2 поколения. [11, 15, 16].

Таким образом, предложенный подход к использованию растений *in vitro* для озеленения городской среды имеет множество преимуществ. Во-первых, такие растения обладают высокой генетической однородностью и предсказуемостью, что позволяет создавать единообразные зеленые пространства. Во-вторых, выращивание *in vitro* позволяет избежать многих болезней и вредителей, снижая потребность в пестицидах и способствуя улучшению городской экологии. Кроме того, метод клеточной культуры обеспечивает быстрое размножение редких или инрайонированных видов, что увеличивает биоразнообразие и способствует восстановлению экосистем. Растения, полученные таким образом, можно адаптировать к специфическим климатическим условиям, что повышает шансы на их успешное укоренение и рост. Также использование растений *in vitro* содействует созданию устойчивых городских экосистем, улучшая качество среды и создавая комфортные пространства для его жителей.

Ключевой сложностью при работе с растениями *in vitro* является процесс их адаптации к естественным условиям. Адаптация считается лимитирующим этапом клонального микроразмножения, результаты которого зависят от состояния укорененных растений и используемого способа адаптации. Важные аспекты включают изучение реакции растений на изменение температуры, уровня влажности и светового режима, а также определение условий, способствующих успешному укоренению и росту, и скорости их адаптации к новым условиям [10-12].

Архангельск, расположенный в устье реки и близости Белого моря, отличается климатом, который обеспечивает мягкие зимы и умеренные летние температуры, создавая благоприятные условия для интродукции лиственных древесных пород. В городе наблюдаются небольшие колебания дневных и ночных температур, высокая влажность, а также достаточное количество осадков в размере 600-700 мм в год, что способствует увлажнению почвы. Вегетационный период длится около 140 дней, что оптимально для фотосинтеза и развития растений, а амплитуда температур варьируется от -30 °С зимой до +30 °С летом, что тоже позволяет местным видам адаптироваться. Особенно важен микроклимат, формируемый «городскими островами тепла», которые

смягчают зимние холода. Роза ветров отличается от пригородной, наличие высоких строений формирует особый микроклимат, что способствует созданию комфортных условий для акклиматизации, а высокая влажность воздуха улучшает укоренение растений [17]. Все эти климатические и микроклиматические факторы совместно создают оптимальные условия для успешной акклиматизации берёзы далекарлийской и других лиственных деревьев в г. Архангельске.

Важно отметить, что в климатических условиях г. Архангельска нет известных исследований по интродукции растений *in vitro*, в связи с чем имеется много открытых вопросов на данную тему, включая их адаптацию к малоблагоприятным условиям климата, долгосрочность выживаемости, а также влияние климатических факторов, таких как низкие температуры и высокая влажность. Требуется изучения и вопрос патологической устойчивости, влияние состава почвы на рост и доступность питательных веществ, взаимодействие с микробиотой почвы и социально-экономические аспекты целесообразности внедрения таких растений в ландшафтные проекты. Устранение этих пробелов может открыть новые перспективы для озеленения г. Архангельска.

Целью настоящих исследований является подбор оптимальных условий акклиматизации посадочного *in vitro* материала *Betula pendula var. Dalecarlica* в условиях г. Архангельска. Задачами работы явилось выявить наиболее эффективную методику предварительной адаптации саженцев, полученных методом *in vitro* с целью повышения их устойчивости к факторам среды произрастания, а также провести мониторинг показателей роста и развития акклиматизируемых растений в зависимости от используемых условий адаптации.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются *ex-vitro* растения березы далекарлийской, полученные методом клонального микроразмножения и транспортированные к месту проведения эксперимента.

Адаптация растений к нестерильным условиям была произведена лабораторией-производителем. Транспортировка саженцев из лаборатории была осуществлена по истечению двухмесячного срока выращивания. Перевозился посадочный материал в кассетах по 84 ячейки в субстрате. В совокупности транспортировка заняла около 5 дней.

После прибытия большая часть растений выглядела жизнеспособными и имела удовлетворительный вид (рис.1), однако у 35% растений листья имели сильные признаки дехромации, часть листьев засохла, при этом растения имели зеленую надземную часть и крепкие корни. Доля полностью погибших растений на данном этапе составила 12%. Вероятно, все эти дефекты могли возникнуть в результате воздействия недостатка освещения и воды при транспортировке.



Рисунок 1. Вид растений *in vitro*

Figure 1. Plant species *in vitro*

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Начальная адаптация заключалась в восстановлении тургора зеленой массы и выявлении отпада растений [18].

После транспортировки растения были помещены на 7 суток в условия гидропонной установки. Гидропоника позволяет экономить пространство и при этом создавать контролируемые параметры микроклимата, в которых особенно нуждаются растения *in vitro*, что формирует предпосылки для успешной акклиматизации растений и является преимуществом данной технологии по сравнению с традиционными методами.

Визуальная оценка состояния растений имеет важное значение для понимания их здоровья и роста, и она часто коррелирует с биологическими параметрами, такими как потеря тургора и повреждение корневой системы. Например, уменьшение тургора может проявляться в виде увядания или потери жесткости листьев, что служит индикатором недостаточной влаги или повреждений корней. Поврежденная корневая система может также ограничивать способности растений к поглощению воды и питательных веществ, что визуально проявляется в медленном росте или изменении окраски листьев. Таким образом, оценка как визуальных признаков, так и биологических параметров позволяет дополнительно оценить состояние растений и выявить возможные проблемы.

Были подобраны следующие условия микроклимата в гидропонике: 16-часовой фотопериод, искусственное освещение, соответствующее 4500 лк, влажность – 62%, температура – 26-28 °С, полив методом подтопления. Специализированные препараты и гормональные стимуляторы не использовались. Вода для полива имела кислотность, близкую к нейтральной (pH = 7,1).

Через неделю производилась пересадка растений в больший объем, в пластиковые контейнеры по 0,5 л, без заглубления корневой шейки, что позволяет корневой системе развиваться в достаточно ограниченном пространстве, обеспечивая при этом

необходимое место для роста корней и поглощения питательных веществ.

В качестве субстрата использовали торф (Агробалт, рН = 5,5) с добавлением перлита и вермикулита в соотношении 7:2:1, что обусловлено необходимостью создания оптимальных условий для аэрации корней и удержания влаги. Такое соотношение способствует хорошему дренажу и предотвращает заболачивание, что особенно важно для здоровья растений.

При этом в нашей работе учитывался успешный опыт известных аналогичных исследований [19-21].

Через две недели эксперимента растения поместили в различные условия: теплица, открытый грунт и гидропоника (взято за эталон).

В условиях теплицы средняя температура среды в солнечный день составляла порядка 24-26°C, влажность – 76%, в пасмурный день – 19°C, влажность – 65%, интенсивность освещения – 4300 лк, полив осуществлялся два раза в неделю, дополнительно в течение дневного времени суток работало туманное орошение.

В открытом грунте средняя температура воздуха была около 20°C, влажность воздуха – 62% в пасмурный день; в солнечный день температура составляла в среднем 23°C, влажность – 48%, интенсивность освещения – 4600 лк, режим полива – осадки, при их отсутствии – полив два раза в неделю.

В условиях гидропонной установки средняя температура окружающей среды составляла около 25-28°C, влажность – 62%, интенсивность освещения – 4500 лк, полив был организован два раза в неделю методом подтопления.

Разница во влажности между условиями значительно влияет на развитие растений. Высокая влажность в теплице улучшает усвоение воды и питательных веществ, создавая благоприятные условия. Также она снижает испарение с листьев, что способствует более эффективной транспирации и фотосинтезу. В открытом грунте низкая влажность может замедлять развитие растений и служить стрессовым фактором.

Условия полива различаются между группами растений, что также может оказывать влияние

на их рост и развитие. Например, в открытом грунте растения зависят от естественных осадков, что делает их более уязвимыми к колебаниям климата и неравномерному распределению влаги, что может приводить к замедлению роста. В открытом грунте равномерность полива контролировалась с помощью регулярного наблюдения за состоянием почвы у растений. В теплицах с туманным орошением обеспечивалась равномерная подача влаги, что способствовало оптимальному развитию корневой системы. В гидропонике применялось подтопление, которое гарантировало быстрое и контролируемое снабжение влагой, что могло ускорить рост растений, но требовало контроля во избежание переувлажнения и дефицита кислорода для корней. Следовательно, каждый метод полива мог отразиться на развитии растений.

Температура также имела ключевую роль. В солнечные дни температура активизировала фотосинтез, но увеличивала испарение. В теплицах, где температура контролируется, растения лучше адаптируются. В пасмурные дни температура была ниже, что замедляло обмен веществ, но теплица обеспечивала стабильные условия для активного роста. Поэтому теплица создавала более комфортную среду для растений по сравнению с открытым грунтом.

Показатели температуры и влажности имеют ключевое значение для роста и развития растений, поскольку влияют на физиологические процессы растений. Оптимальный температурный режим способствует активному обмену веществ и повышению активности ферментов, что, в свою очередь, ускоряет рост и развитие растений. Слишком низкие или слишком высокие температуры могут замедлить рост, привести к стрессу и повреждениям. Влажность создает условия для усвоения питательных веществ и воды, а ее нехватка влаги приводит к увяданию и снижению роста. Поэтому создание оптимальной температуры и влажности является основой для успешной акклиматизации растений.

Помимо температуры и влажности были стандартизированы интенсивность освещения и идентичный для всех условий опыта субстрат, которые обеспечивали равные стартовые условия для всех групп, уменьшая вариации в результатах.

Естественные науки и лес

После пересадки в индивидуальные контейнеры каждые 10 дней производились замеры высоты стволика, количества листьев и количества междоузлий. Эти параметры напрямую отражают рост и развитие растений, предоставляя простые и наглядные данные о процессе вегетации. Высота растения является индикатором его общего состояния и способности к фотосинтезу, тогда как количество междоузлий служит показателем темпов роста, так как частые междоузлия указывают на активное удлинение стебля. Количество листьев оказывает важное влияние на фотосинтетическую активность и, следовательно, на здоровье растения. Однако стоит учесть, что изучение, например, корневой системы могло бы дать дополнительное представление о влиянии

методов выращивания, но это мы не могли сделать ввиду вероятности полной утраты растений после манипуляций с корневой системой.

Результаты и обсуждение

Собранные данные оценивались на основе статистического анализа, критерия Стьюдента и анализа корреляции средних параметров растений.

Данные учёта возможных выбросов, то есть растения с выраженными повреждениями в общей обработке данных не участвовали.

В таблице 1 представлена характеристика прироста растений на 30 и 40 день после их пересадки.

Таблица 1

Статистический анализ прироста через 30 и 40 дней

Table 1

Statistical analysis of growth after 30 and 40 days

Место эксперимента / параметр Experiment location /parameter	Max	Min	M ± m, см cm	σ, см cm	C, %	Доверительный интервал Confidence interval
30-й день The 30 th day						
Высота, см Height, cm						
Открытый грунт Open ground	22,0	7,0	14,0±0,7	4,1	29%	11,6-16,4
Теплица Greenhouse	25,0	11,5	17,3±0,8	4,5	26%	14,6-19,9
Гидропоника Hydroponics	35,0	10,5	24,5±1,3	7,4	30%	20,1-28,9
Количество листьев, шт. Number of leaves, pcs.						
Открытый грунт Open ground	12,0	7,0	11,5±0,6	3,6	31%	9,4-13,6
Теплица Greenhouse	14,0	8,0	11,7±0,3	1,8	15%	10,7-12,8
Гидропоника Hydroponics	32,0	10,0	20,5±1,1	6,3	31%	16,8-24,3
Количество междоузлий, шт. Number of internodes, pcs.						
Открытый грунт Open ground	21,0	2,0	10,9±1,0	5,7	52%	7,5-14,3
Теплица Greenhouse	22,0	10,0	14,4±0,6	3,2	22%	12,5-16,2
Гидропоника Hydroponics	32,0	8,0	18,6±1,3	7,4	40%	14,3-23,0
40-й день The 40 th day						
Высота, см Height, cm						
Открытый грунт Open ground	22,5	7,5	14,4±0,8	4,3	30%	11,8-16,9
Теплица Greenhouse	26,0	12,5	18,3±0,8	4,7	26%	15,5-21,1
Гидропоника Hydroponics	41,0	10,0	28,5±1,6	9,3	32%	23,1-34,0
Количество листьев, шт. Number of leaves, pcs.						
Открытый грунт Open ground	20,0	6,0	11,2±0,8	4,4	40%	8,6-13,8
Теплица Greenhouse	15,0	9,0	12,3±0,3	1,7	14%	11,2-13,3
Гидропоника Hydroponics	28,0	10,0	17,7±1,0	5,8	33%	14,3-21,2

Количество междоузлий, шт. Number of internodes, pcs.							
Открытый грунт Open ground	23,0	7,0	13,4±0,8	4,3	32%	10,8-15,9	
Теплица Greenhouse	24,0	13,0	16,5±0,6	3,4	20%	14,5-18,5	
Гидропоника Hydroponics	38,0	9,0	25,7±1,4	7,9	31%	21,1-30,4	

Примечание: М – среднее значение параметра, m – стандартная ошибка параметра; σ , см – среднеквадратичное отклонение по выборке; C, % – коэффициент вариации. | Note: M is the mean value of the parameter, m is the standard error of the parameter; σ , cm is the standard deviation of the sample; C, % is the variation coefficient.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Данные (табл.1) показали, что наибольших параметров по сравнению с растениями из других условий эксперимента, достигли саженцы, пребывавшие в условиях гидропонии. Растения в теплице имели промежуточные результаты, а самые минимальные – были у сеянцев в открытом грунте.

Показатели прироста варьировались в пределах 20-40% на 40-е сутки, а в первый учет максимальный коэффициент вариации наблюдался по количеству междоузлий в условиях открытого грунта. Наибольшее количество листьев отмечалось у растений в гидропонной установке, соответственно, где и количество междоузлий тоже было максимальным.

Условия открытого грунта, а именно влияние погодных условий, явились дополнительным фактором стресса и как следствием замедленного роста и развития посадочного материала. В открытом грунте значения параметров сильно варьировались по всем измеряемым параметрам, но сохранялась зависимость высоты растений от количества междоузлий.

В теплице растения имели средние показатели роста, что могло быть связано с некоторым контролем влажности и температуры, создающими более благоприятную среду по сравнению с открытым грунтом. Условия теплицы смягчали влияние внешних факторов, что способствовало лучшей акклиматизации растений.

Для березы повислой первого года согласно «ОСТ 56-98-93. Отраслевой стандарт. Сеянцы и саженцы основных древесных и кустарниковых пород. Технические условия» стандартными для средней подзоны тайги европейской части России считаются саженцы, имеющие высоту стволика не менее 20 см. В нашем случае только посадочный материал в условиях гидропонии по истечению одного месяца выращивания соответствовал ОСТу (табл. 1).

Для наглядности распределение растений по крупности в различных условиях проводимого эксперимента представлено на рис.2.

Естественные науки и лес

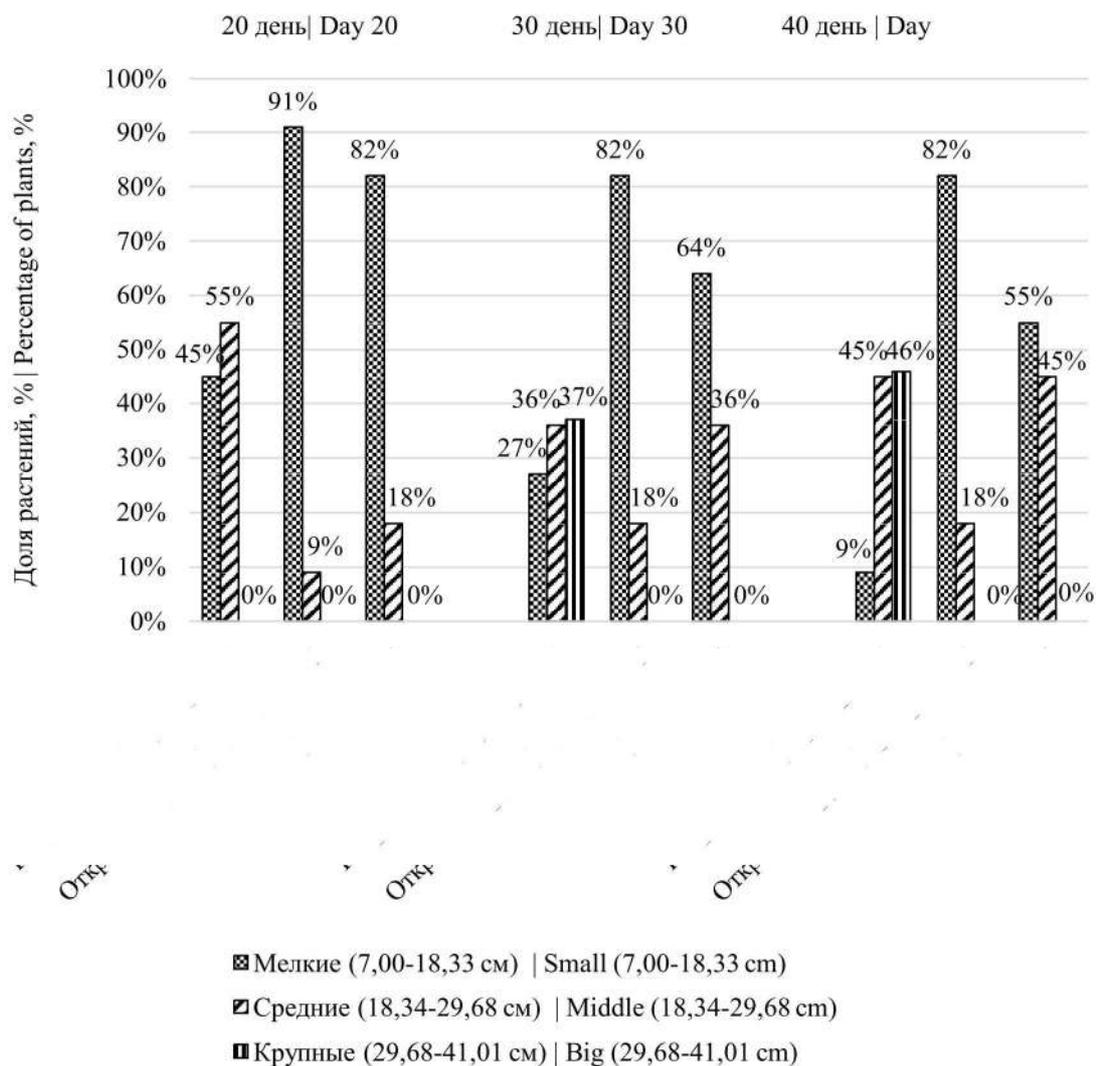


Рисунок 2. Распределение растений по крупности

Figure 2. Distribution of plants by size

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

В ходе исследования у гидропонных растений изначально не было отмечено категории «крупных», при этом преобладали «средние» растения (55%) и достаточно большая доля «мелких» (45%). Однако на 30-й день после пересадки доля «крупных» растений в гидропонике возросла до 37% от общего числа, в то время как остальное составили «средние» растения.

В условиях теплицы на протяжении всего эксперимента наблюдались только «мелкие» растения,

чья доля колебалась от 82% до 55%, и «средние» экземпляры составляли от 18% до 45%.

В открытом грунте также отмечалось значительное преобладание «мелких» растений (91-82%), в то время как «средние» занимали лишь оставшуюся долю. Возможные причины таких данных могут заключаться в различных условиях уровня освещения, температуры, влажности, а также режима полива.

С учетом того, что распределение исходных данных имеет нормальный характер, достоверность

отличий средних величин морфологических параметров посадочного материала на 30-й и 40-й день опыта в зависимости от условий выращивания оценивалась по критерию Стьюдента (табл. 2). При

этом критическое значение при доверительной вероятности 0,05 было принято равным 2,201.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента Стьюдента на 30-й и 40-й день

Table 2

Calculated values of the Student coefficient on the 30th and 40th day

Сравнимые средние параметры растения Comparable average plant parameters	Средние параметры растений Average plant parameters	Расчетные значения коэффициента Стьюдента ($t_{кр} = 2,201$) Calculated values of the Student coefficient ($t_{cr} = 2,201$)	
		30 день Day 30	40 день Day 40
		Гидропоника и открытый грунт Hydroponics and open ground	Высота Height
Количество междоузлий Number of internodes	2,75		4,56
Количество листьев Number of leaves	4,15		2,97
Гидропоника и теплица Hydroponics and greenhouse	Высота Height	2,76	3,28
	Количество междоузлий Number of internodes	1,76	3,55
	Количество листьев Number of leaves	4,45	2,97
Открытый грунт и теплица Open ground and greenhouse	Высота Height	1,79	2,03
	Количество междоузлий Number of internodes	1,76	1,92
	Количество листьев Number of leaves	0,23	0,76

Примечание: $t_{расч.}$ – расчетное значение критерия Стьюдента.

| Note: $t_{calc.}$ – calculated value of the Student's criterion.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

На 30-й и 40-й день наблюдений растения, выращенные в гидропонике, демонстрировали значительные отличия по всем показателям по сравнению с растениями в открытом грунте. Также были выявлены заметные различия между средними показателями растений в гидропонике и растениями,

пребывавшими в теплице. В то же время, при сравнении растений открытого грунта и теплицы, статистически значимых различий обнаружено не было. Такие результаты могут быть обусловлены особенностями условий гидропонике по обеспечению и поддержанию постоянных условий для роста,

Естественные науки и лес

например, оптимальный уровень влаги и освещенности, чего нет в открытом грунте и в теплице.

На рис. 3 представлен внешний вид растений, выращенных в различных условиях, что позволяет провести их визуальный сравнительный анализ

и отметить заметные отличия цвета и текстуры листьев.



Рисунок 3. Внешний вид растений: 1 – открытый грунт, 2 – теплица, 3 – гидропоника
Figure 3. Appearance of plants: 1 – open ground, 2 – greenhouse, 3 – hydroponics

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

В открытом грунте растения выглядят меньше всего по сравнению с другими условиями пребывания: имеют в целом небольшие размеры и скудное количество листьев неравномерного оттенка с присутствием светлых или желтоватых пятен, что может быть следствием воздействия внешних факторов, таких как постоянные изменения температуры, влажности, а также воздействия прямых солнечных лучей.

У растений, размещенных в теплице, наблюдалось заметно больше зеленой массы: растения выглядели крупнее и имели больше листьев, чем в

грунте, однако их окраска была не равномерна и имела бурые пятна.

В гидропонике растения представляли собой самую крупную группу, с обильной зеленой массой. Листья таких растений имели однотонный темно-зеленый окрас, без пятен и были в разы крупнее, чем у аналогичных экземпляров из других условий опыта, что вероятно связано с оптимизированным доступом к стабильным и благоприятным факторам среды.

Естественные науки и лес

Таким образом, наглядно видно, как каждый метод выращивания повлиял на внешний вид растений и их общие характеристики.

Корреляционный анализ показателей роста и развития растений, представленный в таблице 3, показал, что на 30-й день эксперимента существует

значимая зависимость между высотой растений и количеством междоузлий в условиях грунта и теплицы, с коэффициентом корреляции 0,64. При этом также спустя месяц в теплице была установлена корреляция между высотой растения и количеством листьев, равная 0,52.

Таблица 3

Корреляционная связь параметров на 30-й и 40-й день

Table 3

Correlation of parameters on the 30th and 40th day

Место эксперимента / Значение коэффициента корреляции Experiment location / Correlation Coefficient Value	Высота и количество листьев Height and number of leaves	Количество листьев и количество междоузлий Number of leaves and number of internodes	Высота и количество междоузлий Height and number of internodes
30-й день the 30 th day			
Гидропоника Hydroponics	0,34	0,25	0,36
Открытый грунт Open ground	0,35	0,10	0,64
Теплица Greenhouse	0,52	0,10	0,64
40-й день the 40 th day			
Гидропоника Hydroponics		0,12	0,66
Открытый грунт Open ground	0,17	-0,13	0,79
Теплица Greenhouse	0,65	-0,13	0,79

Источник: собственные вычисления авторов. | Source: authors' own calculations.

На 40-й день исследования зависимость между высотой и количеством междоузлий сохранялась во всех экспериментальных условиях.

При этом наблюдалось также увеличение корреляции между высотой растения и количеством листьев в теплице, которое составило 0,65.

Такие результаты могут быть объяснены тем, что увеличение высоты растений обычно сопровождается увеличением числа междоузлий и листьев,

Заключение

Результаты исследования по адаптации березы далекарлийской в различных условиях выращивания: открытом грунте, теплице и гидропонике, показали значительные отличия в развитии растений. Исследование проводилось на основе основных морфометрических параметров растений, таких как высота, количество листьев и количество междоузлий. При этом наибольшую чувствительность к

что позволяет сделать вывод о благоприятных условиях создаваемого микроклимата для развития данных параметров.

В других условиях зависимости не наблюдались, что может свидетельствовать о том, что влияющие факторы были недостаточно благоприятными для роста растений.

условиям проявили высота растений и количество междоузлий.

В открытом грунте береза проявила устойчивость к естественным погодным условиям, однако имела самые наименьшие показатели: доля «мелких» растений составляла 82-91% (7-18 см) на протяжении всего исследования, «крупные» экземпляры отсутствовали. В данной среде рост березы

ограничивался факторами окружающей среды, такими как недостаток влаги и изменение температуры.

Теплица обеспечила более стабильные условия, что способствовало интенсивному росту и развитию растений благодаря контролю температуры и влажности. Здесь доля мелких растений составляла 55% к концу эксперимента (на начало опытов их было 82%), остальную часть (45%) составляли растения среднего размера (18,3-29,7 см).

Гидропоника, в свою очередь, оказалась наиболее эффективной средой для адаптации березы далекарлийской, полученной методом *in vitro*, обеспечивая оптимальные условия выращивания, что привело к наилучшим показателям роста: доля «мелких» экземпляров на конец опытов была 9%, а «крупные» растения составляли 46% (29,7-41 см).

Кроме того, гидропонные растения имели наибольшие отличия по остальным параметрам учета (количеству листьев и междоузлий) по сравнению с растениями в теплице и открытом грунте.

На основе полученных данных можно рекомендовать использование тепличных условий для выращивания березы в регионах с часто меняющимся климатом, а гидропонные системы – для получения максимальных показателей роста и ускорения развития. Эти рекомендации могут быть полезны как для специалистов, так и для любителей, желающих внедрить березу далекарлийскую в ландшафтном дизайне.

Важно отметить, что наше исследование проводилось на лимитированной выборке, что может ограничивать обобщаемость результатов для других видов растений.

Список литературы

1. Крайнова А. А. Далекарлийская береза как редкий и перспективный вид для озеленения северных территорий / А. А. Крайнова, А. М. Антонов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции 24-26 мая 2023 г. / Под. ред. А.А. Добровольского. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – С. 511-514. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=sjpcpz&ysclid=m73ja8djaf466065255>.
2. Jinxiu Ke, Duo Chen, Yanping Guo. Designing leaf marginal shapes: Regulatory mechanisms of leaf serration or dissection: Biodiversity Science. 2018; 26(9): 988-997. DOI: <https://doi.org/10.17520/biods.2018127>.
3. Chitwood D.H., Sinha N.R. Evolutionary and environmental forces sculpting leaf development: Curr. Biol. 2016; 26(7): 297–306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.02.033>.
4. Калякина Р. Г. Влияние интенсивности движения автотранспорта на величину асимметрии листовой пластинки березы повислой / Р. Г. Калякина, А. С. Журавлев, А. А. Дмитриев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2017. – № 47. – С. 110-113. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-intensivnosti-dvizheniya-avtotransporta-na-velichinu-asimmetrii-listovoy-plastinki-berezy-povisloy?ysclid=m73nt82ddh910196931>.
5. Петункина Л.О. Береза повислая как индикатор качества городской среды / Л.О. Петункина, А.С. Сарсацкая // Вестник Кемеровского гос. ун-та. – 2015. – № 4-3(64). – С. 68-71. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24986475&ysclid=m73o4z8hz0126229826>.
6. Пихтовникова Н. А. Влияние осадков на пылезадерживающую способность листьев кустарников / Н. А. Пихтовникова, И. И. Бурдина, Л. И. Аткина // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования и науки РФ, Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2017. – С. 271–273. – Режим доступа : <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6481>.
7. Беляева Ю.В. Распределение показателей количества пыли на листовых пластинках *Betula pendula* Roth., произрастающей в Г.О. Тольятти / Ю.В. Беляева // Известия Самарского науч. центра РАН. – 2015. – № 4-5. – С. 989-993. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-pokazateley-kolichestva-pyli-na-listovyh-plastinkah-betula-pendula-roth-proizrastayushey-v-g-o-tolyatti?ysclid=m73p3ue0x6865122487>.

8. Машкина О.С. Морфогенез рассеченного листа березы в культуре *in vitro* / О.С. Машкина, Т.М. Табацкая // Российский журнал биологии развития. – 2020. – Т. 51. – С. 397-409. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44096007>.
9. Vitamvas J., Kunes I., Viehmannova I., Linda R., Balas M. *Conservation of Betula oycoviensis, an endangered rare taxon, using vegetative propagation methods*. iForest. 2020; 13: 107–113. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3243-013>.
10. Zhang L.-J., He J.-Y., Sun X.-M. *Tissue Culture and Plantlet Regeneration of Betula pendula Roth 'Dalecarlica'*. Forest Research. 2018; 31(4): 135–141. DOI: <https://link.cnki.net/doi/10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.04.019>.
11. Кулагин Д.В., Константинов А.В., Кирьянов П.С., Карунос А.С. Некоторые аспекты воспроизводства редких и декоративных представителей рода *Betula in vitro* для получения посадочного материала // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Биотехнология: достижения и перспективы развития» Пинск, Полесский ГУ, 7–8 декабря 2017 г. Пинск: Полесский ГУ, 2017. С. 24–26. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32443030&pf=1>.
12. Rathwell R., Shukla M.R., Jones M.P., Saxena P.K. *In vitro propagation of cherry birch (Betula lenta L.)*. Canadian Journal of Plant Science. 2016; 96: 571-578. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0331>.
13. Лутова Л. А. Факторы в генетике развития и эволюции высших растений / Л. А. Лутова, И. Е. Додуева, М. А. Лебедева, В. Е. Творогова // Генетика. – 2015. – Т. 51 – № 5. – С. 449–466. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23299397&ysclid=m73qn8da2d971881507>.
14. Лебедева М. А., Эпигенетические механизмы и их роль в развитии растений / М. А. Лебедева, В. Е. Творогова, О. Н. Тиходеев // Генетика. – 2017. – Т. 53. – № 10. – С. 1057–1071. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30075251>.
15. Емельянова О.Ю. Перспективы интродукции растений рода *Betula L.* в Орловской области / О.Ю. Емельянова, М.А. Макаркина, А.Н. Фирсов // Современное садоводство. – 2018. – №. 4 (28). – С. 61-69. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=36648605&ysclid=m73sp8ztbv981937973>.
16. Vikas K., Sandeep R., Manoj K. T., Deepak K. R. *Application of biotechnology in forestry: nature environment and pollution technology current status and future perspective*. An international quarterly scientific journal. 2015; 14(3): 1-10. ISSN: 0972-6268. URL: [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-53-29-\(27\)B-3197.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-53-29-(27)B-3197.pdf).
17. Зальвская О. С., Интродукция видов дендрофлоры в субарктических условиях: 06.03.01: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – Архангельск, 2022. – 44 с. – URL: <https://narfu.ru/upload/iblock/5e5/avtoreferat.pdf>.
18. Крайнова А. А. Начальная адаптация посадочного материала *ex-vitro Betula Pendula var. Dalecarlica* после транспортировки // А. А. Крайнова, А. М. Антонов, О. П. Лебедева / Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XXII Международной научно-технической конференции (5 декабря 2024 г.). – Вологда: ВоГУ, 2024. – С. 10-12. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36264031&ysclid=m73ubnf9sx176305715>.
19. Машкина О.С. Технология долгосрочного хранения в культуре *in vitro* ценных генотипов березы и выращивание на ее основе посадочного материала / О.С. Машкина, Т.М. Табацкая, Н.И. Внукова // Биотехнология. – Воронеж, 2019. – Т. 34. – № 3. – С. 57-67. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304525>.
20. Лебедев В. Г. Эффективная технология массового получения посадочного материала различных видов березы на основе культуры *in vitro* / В. Г. Лебедев, А. Б. Азарова, М. С. Аркаев, С. А. Невский, К. А. Шестибратов // Биотехнология. – 2017. – Т. 33. – № 2. – С. 76-88. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=29143185>.
21. Способ ускоренного выращивания посадочного материала древесных растений семейства *Betulaceae* на основе клонирования *in vitro*: пат. 2756074 Российская Федерация, МПК 01Н 5/00 / Л. В. Ветчинникова, О. С. Серебрякова. – Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук». – № 2020128604; заявл. 27.08.2020; опубл. 27.09.2021. – Бюл. № 27.

References

1. Krainova A. A. Antonov A. M. *Dalekarijskaya bereza kak redkij i perspektivnyj vid dlya ozeleneniya severnyh territorij* [Dalecarlica birch as a rare and promising species for landscaping in northern territories]. *Rossiyskiy zhurnal «Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie» = The Russian journal «Forests of Russia: politics, industry, science, education»*. 2023; 511-514. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=511514>.
2. Jinxiu Ke, Duo Chen, Yanping Guo. *Designing leaf marginal shapes: Regulatory mechanisms of leaf serration or dissection*: Biodiversity Science. 2018; 26(9): 988-997. DOI: <https://doi.org/10.17520/biods.2018127>.
3. Chitwood D.H., Sinha N.R. *Evolutionary and environmental forces sculpting leaf development*: Curr. Biol. 2016; 26(7): 297–306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.02.033>.
4. Kalyakina, R.G. Zhuravlev, A.S., Dmitriev, A.A. *Vliyanie intensivnosti dvizheniya avtotransporta na velichinu asimmetrii listovoy plastinki berezy povisloy*. [The influence of traffic intensity on the magnitude of leaf blade asymmetry of silver birch]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = The Russian journal «Actual problems of the forest complex»*. 2017; 47: 110-113. (In Russ.). URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-intensivnosti-dvizheniya-avtotransporta-na-velichinu-asimmetrii-listovoy-plastinki-berezy-povisloy?ysclid=m73nt82ddh910196931>.
5. Petunkina L.O. Sarsackaya A.S. *Bereza povislaya kak indikator kachestva gorodskoj sredy*. [Silver birch as an indicator of urban environment quality]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta = The Russian journal «Bulletin of the Kemerovo State University»*. 2015; 4-3(64): 68-71. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24986475&ysclid=m73o4z8hz0126229826>.
6. Pikhtovnikova N. A. Burdina I. I. Atkina L. I. *Vliyanie osadkov na pylezaderzhivayushchuyu sposobnost' list'ev kustarnikov*. [The influence of precipitation on the dust-holding capacity of shrub leaves]. *Lesnaya nauka v realizacii koncepcii ural'skoj inzhenernoj shkoly: social'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy lesnogo sektora ekonomiki : mater. XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.= The Russian journal « Forest science in the implementation of the concept of the Ural engineering school: socio-economic and environmental problems of the forest sector of the economy: materials of the XI International Scientific and Technical Conference»*. 2017; 271–273. (In Russ.). URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6481>.
7. Belyaeva Yu.V. *Raspredelenie pokazatelej kolichestva pyli na listovyh plastinkah Betula pendula Roth., proizrastayushchej v G.O. Tol'yatti*. [Distribution of dust amount indicators on leaf blades of *Betula pendula* Roth., growing in the Tolyatti Urban District]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = The Russian journal «Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»*. 2015; 4-5: 989-993. (In Russ.). URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-pokazateley-kolichestva-pyli-na-listovyh-plastinkah-betula-pendula-roth-proizrastayushchey-v-g-o-tolyatti?ysclid=m73p3ue0x6865122487>.
8. Mashkina O.S. Tabatskaya T.M. *Morfogenez rassechennogo lista berezy v kul'ture in vitro*. [Morphogenesis of dissected birch leaf in vitro culture]. *Rossiyskiy zhurnal biologii razvitiya = The Russian journal «Russian Journal of Developmental Biology»*. 2020; 51: 397–409. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44096007>.
9. Vitamvas J., Kunes I., Viehmannova I., Linda R., Balas M. *Conservation of Betula oycoviensis, an endangered rare taxon, using vegetative propagation methods*. *iForest*. 2020; 13: 107–113. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3243-013>.
10. Zhang L.-J., He J.-Y., Sun X.-M. *Tissue Culture and Plantlet Regeneration of Betula pendula Roth 'Dalecarlica'*. *Forest Research*. 2018; 31(4): 135–141. DOI: <https://link.cnki.net/doi/10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.04.019>.
11. Kulagin D. V. Konstantinov A. V., Kir'yanov P. S., Karunos A. S. *Nekotorye aspekty vosproizvodstva redkih i dekorativnyh predstavitelej roda Betula in vitro dlya polucheniya posadochnogo materiala*. [Some aspects of reproduction of rare and decorative representatives of the genus *Betula* L. in vitro to obtain planting material]. *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Biotekhnologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya = The Russian journal « Collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference “Biotechnology: Achievements and Development Prospects”»*]. 2017; 24-26. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32443030&pf=1>.

12. Rathwell R., Shukla M.R., Jones M.P., Saxena P.K. *In vitro propagation of cherry birch (Betula lenta L.)*. Canadian Journal of Plant Science. 2016; 96: 571-578. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0331>.
13. Lutova L.A., Dodueva I.E., Lebedeva M.A., Tvorogova V. E. *Faktory v genetike razvitiya i evolyucii vysshih rastenij*. [Transcription factors in developmental genetics and the evolution of higher plants]. Rossijskij zhurnal "Genetika" = Russian journal «Genetics». 2015; 51(5): 449–466. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23299397&ysclid=m73qn8da2d971881507>.
14. Lebedeva M.A., Tvorogova V.E., Tikhodeyev O.N. *Epigeneticheskie mekhanizmy i ih rol' v razvitii rastenij* [Epigenetic mechanisms and their role in plant development]. Rossijskij zhurnal «Genetika» = Russian journal «Genetics». 2017. V. 53. № 10. P. 1057–1071. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30075251>.
15. Emelyanova O. Yu., Makarkina M. A., Firsov A. N. *Perspektivy introdukcii rastenij roda Betula L. v Orlovskoj oblasti*. [Prospects for the introduction of plants of the genus Betula L. in the Oryol region]. Rossijskij zhurnal «Sovremennoe sadovodstvo» = Russian journal «Modern gardening». 2018; 4(28): 61-69. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36648605&ysclid=m73sp8ztbv981937973>.
16. Vikas K., Sandeep R., Manoj K. T., Deepak K.R. *Application of biotechnology in forestry: nature environment and pollution technology current status and future perspective*. An international quarterly scientific journal. 2015; 14(3): 1-10. ISSN: 0972-6268. URL: [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-53-29-\(27\)B-3197.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-53-29-(27)B-3197.pdf).
17. Zalyvskaya O. S. Introduction of dendroflora species in subarctic conditions: 06.03.01 : abstract of the dissertation for the degree of Doctor agricultural sciences. – Arkhangelsk, 2022. – 44 p. – URL: <https://narfu.ru/upload/iblock/5e5/avtoreferat.pdf>.
18. Krainova A.A., Antonov A.M., Lebedeva O. P. *Nachal'naya adaptaciya posadochnogo materiala ex-vitro Betula Pendula var. Dalecarlica posle transportirovki*. [Initial adaptation of ex-vitro planting material Betula Pendula var. Dalecarlica after transportation]. Rossijskij zhurnal «Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii» = Russian journal «Actual problems of forest complex development: materials of the XXII International scientific and technical conference». 2024; 10-12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36264031&ysclid=m73ubnf9sx176305715>.
19. Mashkina O. S., Tabackaya T. M., Vnukova N. I. *Tekhnologiya dolgosrochnogo hraneniya v kul'ture in vitro cennyh genotipov berezy i vyrashchivanie na ee osnove posadochnogo materiala*. [Technology of long-term storage in vitro culture of valuable birch genotypes and cultivation of planting material on its basis]. Rossijskij zhurnal «Biotehnologiya» = Russian journal «Biotechnology». 2019; 34(3): 57-67. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38304525>.
20. Lebedev V. G., Azarova A.B., Arkaev M. S., Nevskij S.A., Shestibratov K.A. *Effektivnaya texnologiya massovogo polucheniya posadochnogo materiala razlichnyx vidov berezy na osnove kul'tury in vitro*. [Efficient technology for mass production of planting material of various birch species based on in vitro culture]. Rossijskij zhurnal «Biotehnologiya» = Russian journal «Biotechnology». 2017; 33(2): 76-88. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29143185>.
21. Method for accelerated cultivation of planting material of woody plants of the Betulaceae family based on in vitro cloning: pat. 2756074 Russian Federation, MPK At 01H From 5/00 / L.V. Vetchinnikova, O.S. Serebryakova – applicant and patent holder Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – No. 2020128604 ; application 27.08.2020 ; publ. 27.09.2021, Issue No. 27.

Сведения об авторах

✉ Крайнова Алина Алексеевна – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: alinakrajnova@yandex.ru.

Антонов Александр Михайлович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: a.antonov@narfu.ru.

Естественные науки и лес

Лебедева Ольга Петровна – заведующий лабораторией клонального микроразмножения растений и экспериментальной гидропоники, ассистент кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», Набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, e-mail: o.lebedeva@narfu.ru.

Information about the authors

✉ *Alina A. Krainova* – postgraduate student of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: alinakrajnova@yandex.ru.

Alexander M. Antonov – candidate of agricultural sciences, associate professor, head of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: a.antonov@narfu.ru.

Olga P. Lebedeva – head of the Laboratory of Clonal Micropropagation of Plants and Experimental Hydroponics, assistant of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, e-mail: o.lebedeva@narfu.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/5>

УДК 630*165.51

Фенологические исследования различных видов лиственниц, произрастающих на территории ГБС РАН

Максим А. Лавренов¹✉, lavrenov@bmstu.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>

Алексей А. Котов¹, kotov@bmstu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

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

Сергей Л. Рысин², ser-rysin@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0000-6635-3114>

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

¹*Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, Мытищи, 141005, Российская Федерация*

²*Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук, Ботаническая ул., 4, Москва, 127276, Российская Федерация*

Аннотация

В работе представлены сроки наступления фенологических фаз различных видов лиственниц, произрастающих в центре европейской части России. Учитывалось набухание и распускание почек, разворачивание хвои и полное охвоение, начало и окончание появления стробил, появление осенней окраски хвои и опадение хвои. Установлено, что весенние фазы могут начинаться с 5 апреля, когда происходит набухание почек и заканчиваться образованием стробил и полным охвоением вплоть до 3 мая. Период от появления осенней окраски хвои до полного опадения хвои может длиться с 23 сентября по 8 декабря. Установлены различия в сезонном развитии между лиственницами американской, европейской, сибирской, Сукачева, Кемпфера, Любарского, Потанина, ольгинской, даурской, курильской. Полученные данные необходимы для оценки адаптационного потенциала этих растений в условиях интродукции. Указаны суммы положительных температур, необходимых для набухания и распускания почек, разворачивания хвои, полного охвоения, начала появления стробил, массового появления стробил, окончания появления стробил, появления осенней окраски хвои, начала и окончания опадения хвои. При анализе межвидовых различий в сезонном развитии выявлена значительная вариабельность: один и тот же вид лиственницы может демонстрировать существенные различия в длительности фенологических фаз в разные годы. Нами представлены результаты исследования за 2022, 2023 и 2024 года. Выявлены климатические различия в этих годах. На графиках представлена связь между накоплением положительных температур и началом фенологических фаз, что подтверждает необходимость учета температурного фактора при прогнозировании появления стробил. Все исследованные виды успешно прошли полный цикл сезонного развития.

Ключевые слова: фенология, лиственница, стробилы, хвоя, температура.

Финансирование: Работа В.А. Брынцева, С.Л. Рысина, А.А. Коженковой выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН по теме № 122042700002-6.

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фенологические исследования различных видов лиственниц, произрастающих на территории ГБС РАН / М. А. Лавренов, А. А. Котов, В. А. Брынцев, С. Л. Рысин, А. А. Коженкова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 64-87. – Библиогр.: с. 83-86 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/5>.

Поступила 0.03.2025. Пересмотрена 26.05.2025. Принята 05.06.2025. Опубликовано онлайн 26.06.2025.

Phenological studies of various types of larches growing on the territory of the main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences

Maxim A. Lavrenov,¹✉, lavrenov@bmstu.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>

Alexey A. Kotov,¹, lavrenov@bmstu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>

Vladimir A. Bryntsev,², bryntsev@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

Sergey L. Rysin,², ser-rysin@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0000-6635-3114>

Anna A. Kozhenkova,², kozhenkova@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

¹*BMSTU (Mytishchi branch), Moscow reg., 1 st. Institutskaya, Mytishi, 141005, Russian Federation*

²*Moscow Botanical Garden of Academy of Sciences, Botanicheskaja, 4, Moscow, 127276, Russian Federation*

Abstract

The paper presents the timing of the onset of the phenological phases of various species of larches growing in the center of the European part of Russia. The swelling and budding, the unfolding of needles and the complete appearance of the needles, the beginning and end of the appearance of strobils, the appearance of autumn color of needles and the falling of needles were taken into account. It has been established that the spring phases can begin on April 5, when the buds swell and end with the formation of strobils and the appearance of needles until May 3. The period from the appearance of the autumn color of the needles to the complete fall of the needles can last from September 23 to December 8. Differences in seasonal development between American, European, Siberian, Sukachev's, Kempfer's, Lyubarsky's, Potanin's, Korean Dahurian, Dahurian, and Kurile Dahurian larches have been established. The data obtained are necessary to assess the adaptive potential of these plants under the conditions of introduction. We calculated the sum of positive temperatures necessary for the swelling and budding, the unfolding of the needles, the complete appearance of the needles, the beginning of the appearance of the strobils, the mass appearance of the strobils, the end of the appearance of the strobils, the appearance of the autumn color of the needles, the beginning and end of the fall of the needles. The analysis of interspecific differences in seasonal development revealed significant variability: the same species of larch can show significant differences in the duration of phenological phases in different years. We have presented the results of the study for 2022, 2023 and 2024. Climatic differences in these years have been revealed. The graphs show the relationship between the accumulation of positive temperatures and the onset of phenological phases, which confirms the need to take into account the temperature factor when predicting the appearance of strobils. All the studied species have successfully passed the full cycle of seasonal development.

Keywords: phenology, larch, strobils, needles, temperature.

Funding: The research was V.A. Bryntsev, S.L. Rysin, A.A. Kozhenkova carried out within the framework of the state assignment of Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences on topic № 22042700002-6.

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

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

For citation: Lavrenov M.A., Kotov A.A., Bryntsev V.A., Rysin S.L., Kozhenkova A.A. (2025). Phenological studies of various types of larches growing on the territory of the main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 64-87 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/5>.

Введение

Исследование фенологического развития видов рода *Larix* Mill. представляет значительный

научный интерес, так как его результаты необходимы для оценки адаптационного потенциала этих

растений в условиях интродукции [1, 2] и понимания биологических и экологических аспектов их развития [3, 4].

На территории европейской части Российской Федерации лиственница является важным интродуцентом, обладающим рядом уникальных биологических характеристик, к числу которых относятся быстрый рост, высокая устойчивость к атмосферным загрязнениям, резистентность к грибковым заболеваниям и энтомовамителям, а также выраженные декоративные и рекреационные качества [5-7]. Поэтому исследования имеют важное прикладное значение для лесного хозяйства, городского озеленения и природоохранной деятельности.

Анализ фенологических фаз дает объективное представление о взаимодействии растений с окружающей средой и влиянии на них различных факторов [8-10], позволяет устанавливать оптимальные сроки для сбора семян, разрабатывать наиболее подходящие схемы воспроизводства леса [11, 12]. Сопоставление фаз развития древесных растений и сопутствующего им появления вредителей и болезней позволяет установить критерии для прогнозирования этих негативных явлений, помогает определить оптимальные временные рамки для борьбы с ними [13, 14].

Научной новизной является сравнительный анализ фенологического развития различных видов лиственниц в условиях г. Москвы (на примере ГБС РАН).

В условиях современного города, существенно отличающихся от природных условий, большинство видов вынуждены адаптироваться к неблагоприятным факторам, что существенно снижает их устойчивость. Городские зеленые насаждения, призванные улучшать качество жизни населения, зачастую сами нуждаются в защите от негативного воздействия урбанизированной среды. Состояние растений может служить индикатором таких воздействий, а реализация комплексного мониторинга, включающего фенологические наблюдения за растениями, необходимо для понимания реакции растительности на абиотические и биотические факторы окружающей среды [15].

Фенологический мониторинг выступает как эффективный инструмент при проектировании и организации ботанических садов и дендрариев. Понимание последовательности и конкретных сроков

прохождения ключевых фенологических фаз древесных растений позволяет осуществлять подбор их ассортимента и оптимальное территориальное размещение в целях создания устойчивых композиций, демонстрирующих максимальную декоративность от ранней весны до поздней осени.

Составление фенологического спектра на основе наблюдений может оказаться полезным при проведении экскурсий в парке или ботаническом саду. Фенологический спектр представляет собой графическое изображение сезонного развития растительных сообществ, где для каждого вида растений фиксируется начало и окончание различных фаз развития (вегетация, цветение, плодоношение). Это способствует рациональному планированию экскурсионной деятельности в парковых зонах и ботанических садах, организации мероприятий по сбору гербарных материалов и семенного сырья, а также проведению комплекса агротехнических мероприятий. Этот подход имеет существенную практическую ценность для специалистов в области дендрологии, ботаники, научных сотрудников и специалистов по ландшафтному дизайну в их профессиональной деятельности.

Целью работы являлось установление сроков наступления фенологических фаз различных видов лиственниц, произрастающих в Главном ботаническом саду РАН.

В задачи исследования входило выявление сумм положительных температур, необходимых для прохождения всех фенологических фаз, а также установление различия в сезонном развитии между различными видами лиственниц.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись 10 видов лиственниц.

Лиственница американская (*Larix laricina* (Du Roi) K.Koch) является одним из видов, генеративные органы которых исследованы только поверхностно не только в условиях интродукции, но и в естественных условиях произрастания. Достигает высоты 15-23 м и от 46 до 51 см в диаметре. В естественных условиях произрастания средняя длина хвои составляет 2,5 см при 10-20 хвоинках в пучке, средняя длина шишек равна 1,3-1,9 см, длина семян около 3 мм.

Лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) являются ценным интродуцентом как в России, так и за рубежом. Достигает в высоту 30-40 м при диаметре ствола 80-100 см. Хвоя в пучках по 20-40 штук, светло-зелёная, шишки яйцевидно-конические или продолговато-яйцевидные, длиной 2-4 см.

Лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) наряду с лиственницей даурской является одной из самых распространенных пород России. В ГБС РАН в 29 лет высотой 20,6 м, диаметр ствола 37/50 см. Нами установлено, что в условиях интродукции в Москву и Подмоскowie длина шишек лиственницы сибирской составляет 28-30 мм, ширина шишек 22-27 мм, число чешуй в шишках составляет в среднем 25-33 шт.

Лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Dylis = *Larix sibirica* Ledeb.) достигает до 40 м и 1-1,2 м в диаметре. Хвоя лиственницы Сукачева по 20-60 шт. в пучке, узколинейная, длиной 15-50 мм. Шишки немного крупнее, чем у сибирской: 2,9-3,5 см. Видовая самостоятельность этой лиственницы оспаривается, в связи с этим проведение исследования является актуальным.

Лиственница Кемпфера (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière) высотой до 35 м и диаметром ствола до 100 см. По нашим исследованиям в условиях интродукции в Москву и Подмоскowie длина шишек лиственницы японской составляет 2,0-2,7 см, шишки шириной 1,6-2,1 см, число чешуй в шишках составляет 31-50 шт. Хвоя длиной 1,5-1,9 см.

Лиственница Любарского (*Larix lubarskii* Sukaczew = *Larix gmelinii* var. *olgensis* (A.Heury) Ostenf.) вырастает в высоту до 25 м при диаметре ствола до 60 см. В условиях интродукции в центр Европейской части России по нашим данным хвоя длиной 1,8-5,3 см, шишки длиной 2,3-4,2 см и шириной 0,9-2,1 см с 26-45 чешуями. Имеющиеся опыты интродукции лиственницы Любарского указывают на перспективность работ по ее селекции в ряде регионов страны, а также широкого использования в озеленении.

Лиственница Потанина (*Larix potaninii* Batalin) является одним из самых южных видов лиственниц. Достигает высоты до 30 м. Хвоя длиной 1,5-3 см, остроконечная, сверху и снизу килеватая. Шишки продолговато-яйцевидные, длиной 3-4,5 см, диаметром 2,5 см.

Лиственница ольгинская (*Larix gmelinii* var. *olgensis* (A.Heury) Ostenf.) достигают высоты до 25, реже до 30 м. Хвоя длиной от 2 до 3 см, узкая, килеватая, тёмно-зелёная, снизу сизая. Шишки имеют округленно-яйцевидную форму, длина 1,8-2,5 см. До сих пор нет единого мнения в отношении ее таксономического статуса, ареала и генетического родства с другими видами, в связи с этим исследования данного вида актуальны.

Лиственница даурская (*Larix gmelinii* (Rupr.) Göpp.) обычно достигает до 25 м в высоту и до 50 см в диаметре. По нашим исследованиям при интродукции лиственницы даурской в центр Европейской части России длина шишек составляет 1,8-2 см, ширина шишек равна 1,3-1,5 см и число чешуй в шишках составляет 26-28 шт. Длина хвои в условиях интродукции составляет 2,0-2,3 см. Является наиболее северной древесной породой.

Лиственница курильская (*Larix kurilensis* Maug = *Larix gmelinii* var. *japonica* (Maxim. ex Regel) Pilg.) достигает высоты до 20 м при 60-80 см в диаметре ствола. Хвоя длиной 1-2 см. Шишки шаровидные, 1-1,5 см длины, имеют 10-20 чешуй, расположенных в 3-4 ряда. Таксономический статус лиственницы курильской до сих пор до конца не ясен, что указывает на актуальность ее дальнейших исследований.

Названия видов приведены в соответствии с их номенклатурой на момент включения в коллекцию. Характеристика видов и время их включения в коллекцию приведены в монографии Древесные растения Главного ботанического сада им. Н. В. Цицина РАН: 60 лет интродукции [16].

Главный ботанический сад РАН находится на территории обширного зеленого массива на севере Москвы. Дендрологическая коллекция занимает 75 га центральной части сада, представляющей собой восточный склон моренного плато, сложенного красно-бурными валунными суглинками. Рельеф выровненный. Гидрологические условия: основной водоносный горизонт расположен на глубине 2-6 м в песчаных и супесчаных отложениях. Почвы дендрария дерново-среднеподзолистые, суглинистые с pH 5,1. Длина безморозного периода в среднем длится 214 дней. Продолжительность вегетационного периода в среднем составляет 173 дня.

Естественные науки и лес

Среднегодовая температура воздуха $3,7^{\circ}$, абсолютный минимум $-40,8^{\circ}$, абсолютный максимум $35,8^{\circ}$. Среднегодовое количество осадков – 537 мм [16].

Полевые исследования проводились в течение 2022-2024 гг. Фенологические наблюдения за развитием лиственниц осуществлялись согласно общепринятым методикам [17-21]. В ходе исследований осуществлялся мониторинг следующих параметров:

- календарные даты наступления фенологических фаз;

- суммы положительных температур;

Были учтены следующие фенологические фазы:

- Набухание почек – Пч₁
- Распускание почек – Пч₂
- Развертывание хвои – Хв₁
- Полное охвоение – Хв₂
- Начало появления стробил – С₁
- Массовое появление стробил – С₂
- Окончание появления стробил – С₃

- Появление осенней окраски – Хв₃
- Начало опадения хвои – Хв₄
- Окончание опадения хвои – Хв₅

На рисунках для компактности фенологические фазы представлены в виде буквенных обозначений.

Основным критерием фиксации наступления фенологической фазы служило её проявление более чем у 50% исследуемых особей конкретного вида лиственницы. Для каждого исследуемого вида лиственницы было отобрано несколько модельных деревьев. Все исследуемые деревья произрастали в схожем типе условий местопроизрастания.

Учет фенологического развития проводился одними и теми же наблюдателями, один раз в два дня. Сумма положительных температур считалась на основании данных метеостанции ВДНХ с использованием Excel. Отсчет температур проводился с 1 января каждого исследуемого года.

Зависимость суммы положительных температур от календарных дат в 2022, 2023 и 2024 годах представлена на рисунке 1.

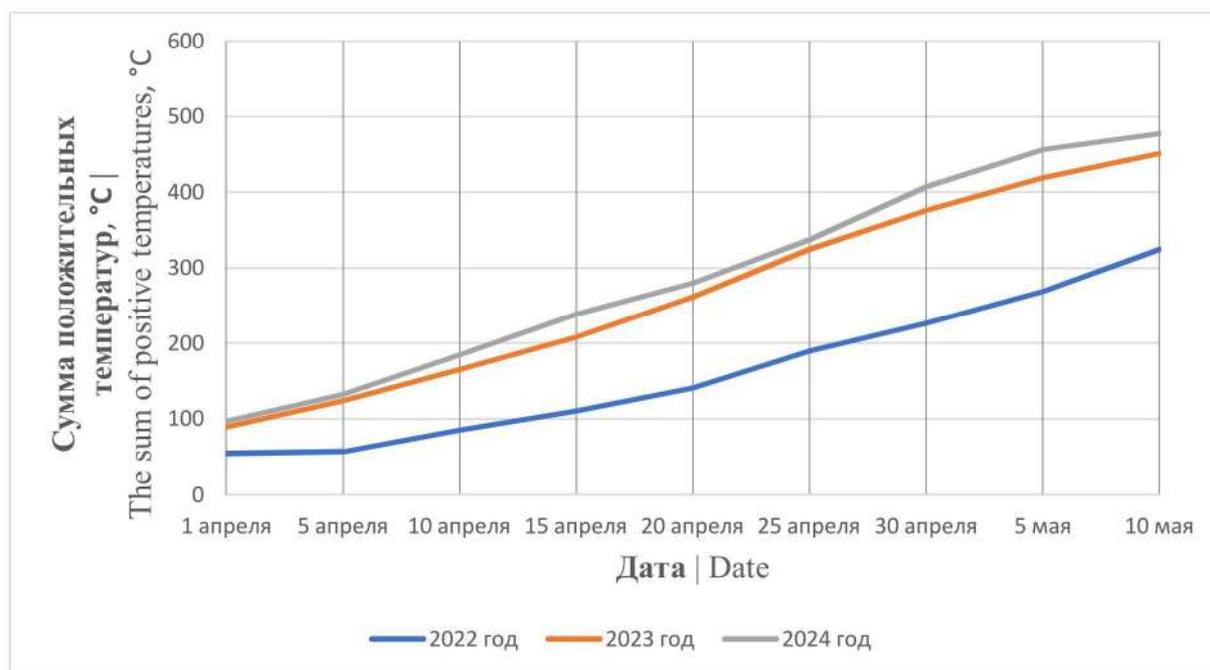


Рисунок 1. Рост суммы положительных температур в зависимости от календарной даты по годам
Figure 1. The increase in the sum of positive temperatures depending on the calendar date by year

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Естественные науки и лес

Анализ данных (рис. 1) показывает, что в 2023 и 2024 годах происходило схожее накопление сумм положительных температур и резкое отличие по данному показателю в более холодном 2022 году.

При построении графиков зависимости наступления фенологических фаз от суммы положительных температур (рисунки 2-11) для улучшения наглядности представления данных по оси ординат была применена логарифмическая шкала (по основанию 2). Это вызвано резкими отличиями в значениях сумм положительных температур весеннего периода по сравнению с осенним.

Для компактности изложения мы показываем (рисунки 2-11) зависимость наступления фенологических фаз каждого исследуемого вида по годам только от суммы положительных температур. Календарные даты и продолжительность прохождения фенофаз приведены в тексте. Сравнения средних дат наступления фенологических фаз (за 2022 -

2024 гг.) для исследованных видов лиственниц представлены в таблицах 1 и 2.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования лиственниц, успешно акклиматизировавшихся в условиях урбанизированной среды г. Москвы, проводилось комплексные фенологические наблюдения. В рамках исследования, фиксировались следующие ключевые фазы развития: весной проводилось наблюдение за распусканием хвои, при котором фиксировались даты набухания и распускания почек, разворачивания хвои и достижения полного охвоения; в период «цветения» (появления стробил) регистрировались даты начала формирования стробил, наступления массового «цветения» и завершения этой фазы; в осенне-зимний период осуществлялся мониторинг появления осенней окраски хвои и последующего листопада (опадения хвои). Эти наблюдения позволили получить полную картину сезонного развития изученных видов лиственниц.

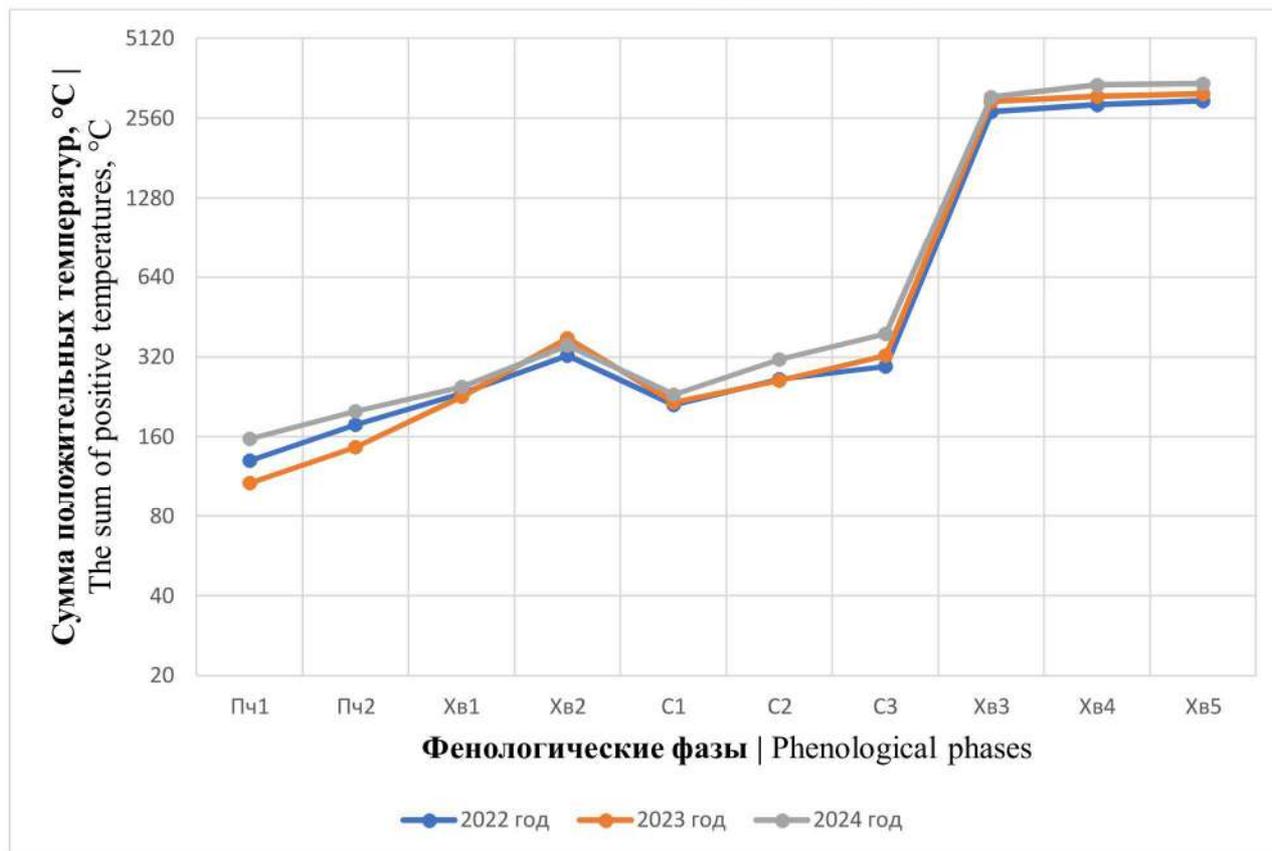


Рисунок 2. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы американской от суммы положительных температур

Figure 2. The dependence of the onset of phenological phases in American larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Естественные науки и лес

В период проведения исследований фенологические наблюдения за лиственницей американской (рис. 2) показали следующие результаты. Набухание почек фиксировалось в широком диапазоне дат - с 3 апреля 2023 г. по 19 апреля 2022 г. Данный разброс обусловлен вариациями в накоплении сумм положительных температур по годам.

При анализе фенофаз развития хвои выявлено: в 2022 и 2024 гг. начальная фенофаза наступала при накоплении температур 131-157 °С. В 2023 г. при достижении суммы температур 147 °С наблюдалось распускание почек. Общий диапазон суммы температур для начала распускания хвои составил 108-157 °С.

Фенофаза «цветения» характеризовалась следующими показателями: суммы положительных температур составляли 132-144 °С, сроки - с середины апреля (14.04.2024) до конца апреля (27.04.2022). Примечательно, что в 2023 г. окончание «цветения» пришлось на 25 апреля, тогда как в

2022 г. на эту дату (27 апреля) только начиналось формирование стробил.

Наиболее стабильный температурный интервал по годам отмечался при начале разворачивания хвои - 227-248 °С. Этот диапазон температур показал наименьшую вариабельность в сроках наступления фенологической фазы по годам, что делает его наиболее надежным показателем для прогнозирования начала разворачивания хвои.

Появление осенней окраски хвои наблюдалось в период с 23 сентября 2024 г. по 4 октября 2023 г., что представляет собой относительно короткий временной интервал, пригодный для дальнейшего прогнозирования фенологических явлений.

Полученные данные подчеркивают важность учета сумм положительных температур при прогнозировании фенологических фаз, наряду с календарными датами.

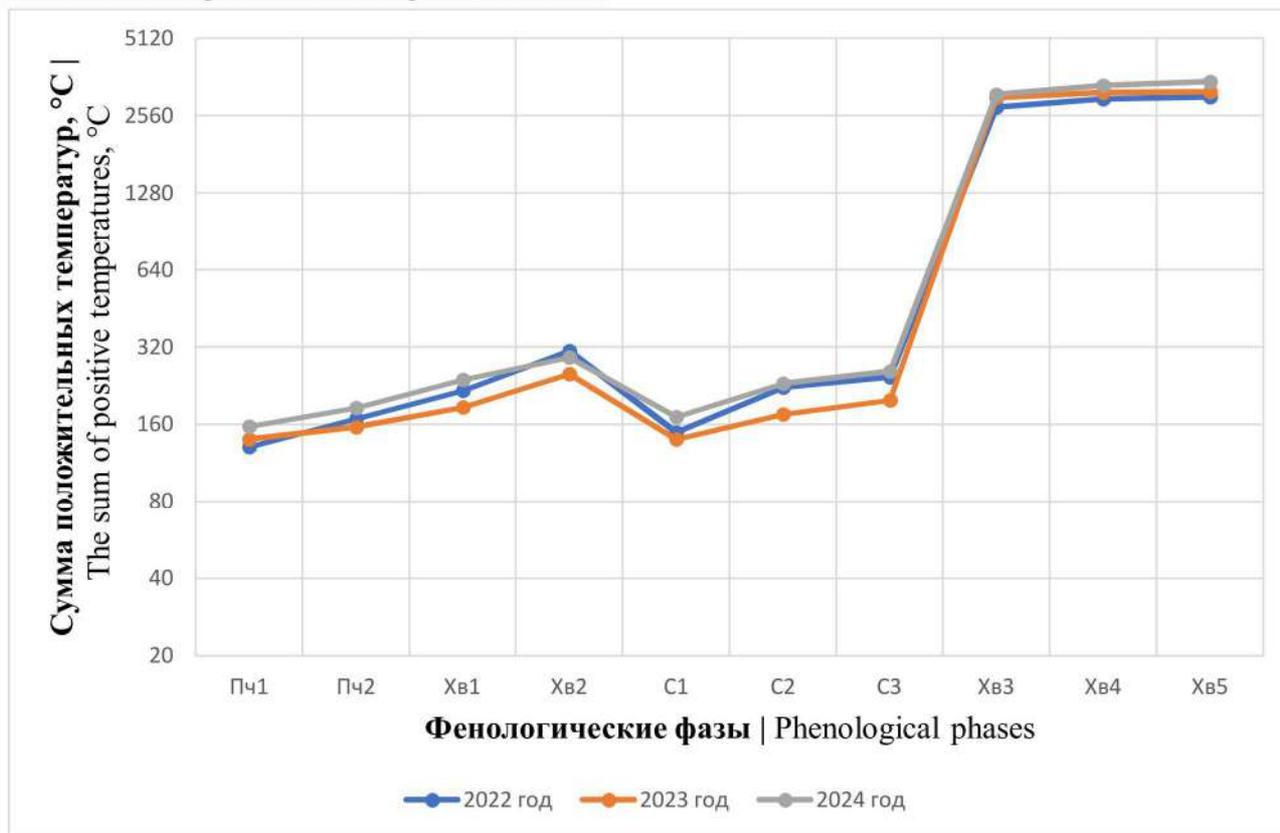


Рисунок 3. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы европейской от суммы положительных температур

Figure 3. The dependence of the onset of phenological phases in European larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Начало распускания листьев у лиственницы европейской (рис. 3) начинается при относительно близких суммах положительных температур, однако календарные даты существенно разнятся – от 7 апреля в 2023 г. до 19 апреля в 2022 г. Период от набухания почек до их распускания прошел у данного вида наиболее быстро и занял от 2 (в 2023 и 2024 гг.) до 4 дней (в 2022 г.). Дальнейший период между разворачиванием хвои и полным охвоением был более длительным и занимал до 10 дней включительно.

Появление стробил в разные годы начинается с 7 по 21 апреля. От появления первых стробил до их массового созревания проходит от 3 (в 2024 г.) до 8 дней (в 2022 г.). Осенняя окраска хвои появляется в промежутке от конца сентября (25 сентября 2024 г.) до середины октября (12 октября 2023 г.). Опадение хвои зарегистрировано с 21 октября по 9 ноября, при этом полное опадение хвои начинается лишь в декабре (от 1 до 13 декабря).

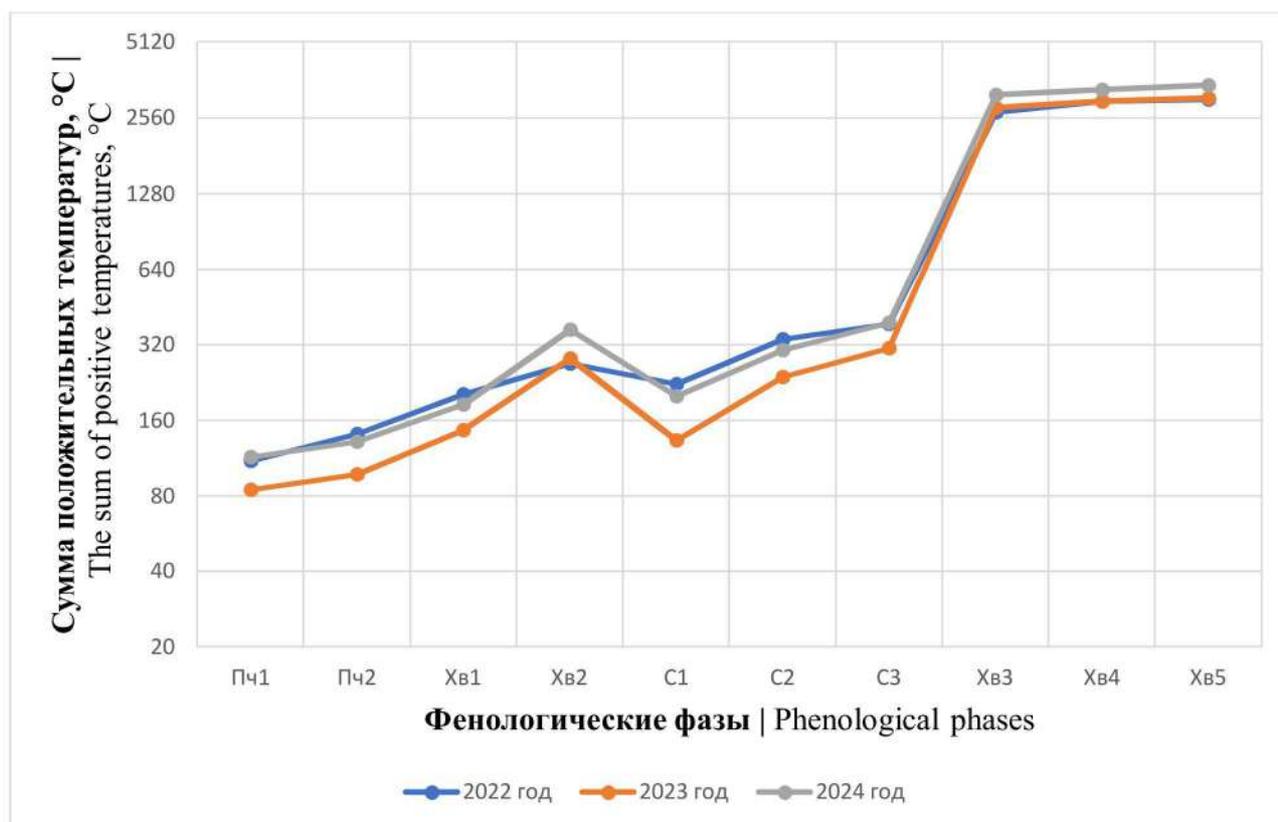


Рисунок 4. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы Кемпфера от суммы положительных температур

Figure 4. The dependence of the onset of phenological phases in Kempfer's larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Набухание почек лиственницы Кемпфера отмечалось с конца марта до середины апреля, в зависимости от года (рис. 4). При этом в 2023 г. период от набухания почек до разворачивания хвои наблюдался с 30 марта по 8 апреля, а в 2022 г. только спустя еще неделю (15 апреля) произошло набухание почек. Такая разница вызвана суммами положительных температур – 8 апреля 2023 г. было накоплено тепла больше, чем 15 апреля 2022 г. При этом в 2023 г. процесс от распускания почек до разворачивания хвои занимал больше времени – 14 дней против 9

дней в 2022 г., что немного выравнивает показатели перед полным охвоением лиственницы. В целом процесс распускания хвои длился от 20 дней (в 2022 г.) до 25 дней (в 2024 г.).

Процесс «цветения» проходил быстрее, чем охвоение – в среднем за 17 дней. В 2023 г. появление стробил произошло также намного раньше по сравнению с 2022 г. – 6 и 29 апреля соответственно. Завершилось «цветение» в период с 24 апреля (2023 г.)

Естественные науки и лес

по 15 мая (2022 г.). Накопленные суммы положительных температур при завершении цветения также отличались, как видно на рисунке 4.

Появление осенней окраски хвои для лиственницы Кемпфера приходится на конец сентября – с 23 по 28 сентября, в зависимости от года исследования.

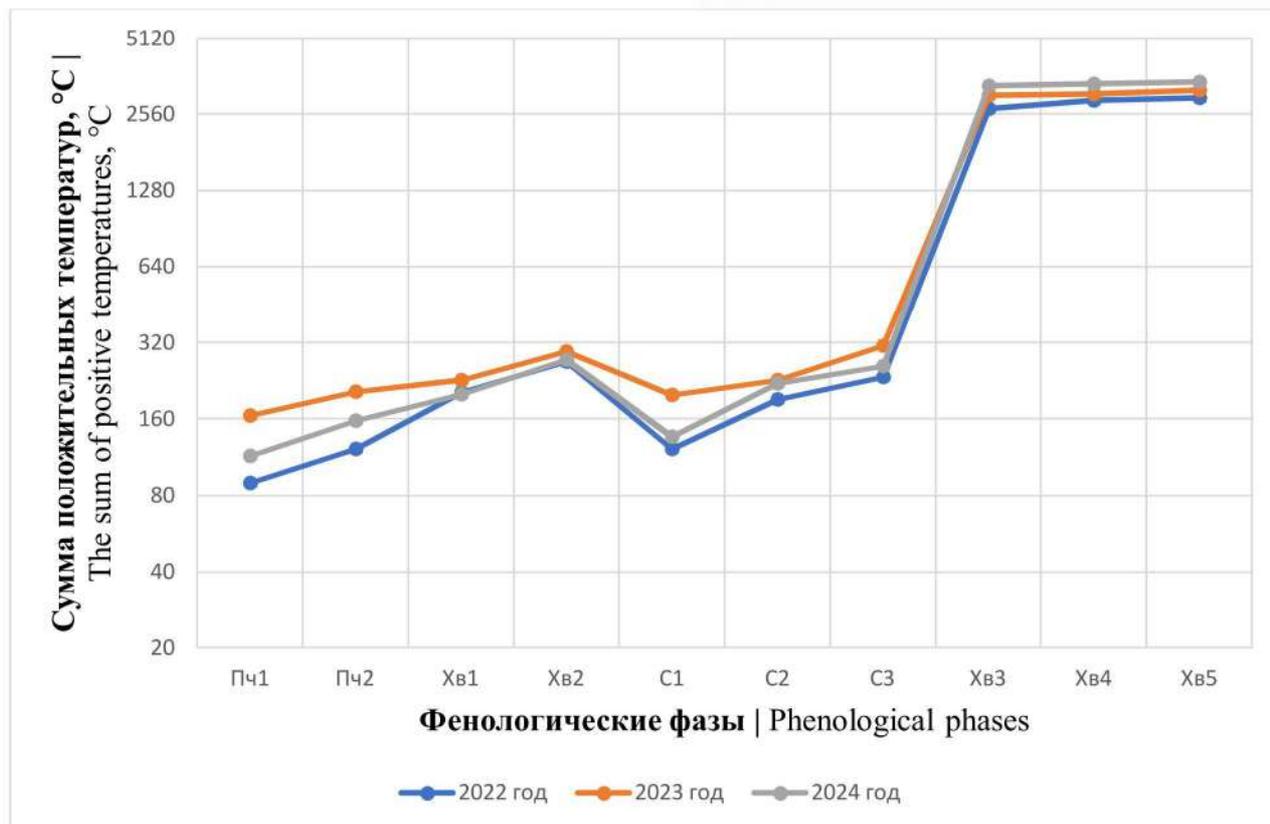


Рисунок 5. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы курильской от суммы положительных температур

Figure 5. The dependence of the onset of phenological phases in Kurile Dahurian larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

У лиственницы курильской (рис. 5) наиболее раннее набухание почек произошло в 2024 г. – 2 апреля, и к 19 апреля наступило полное охвоение. Наиболее длительный процесс распускания хвои наблюдался в 2022 г. – с 11 апреля по 5 мая.

Появление стробил, вслед за распусканием хвои, также наиболее ранним было в 2024 г. и длилось 11 дней – с 6 по 17 апреля. Примечательно, что

в 2022 г. цветение началось только 18 апреля и завершилось 1 мая.

Появление осенней окраски хвои начинается с 23 сентября (2022 г.) по 16 октября (2023 г.). Завершение опадения хвои приходится на начало-середину ноября.

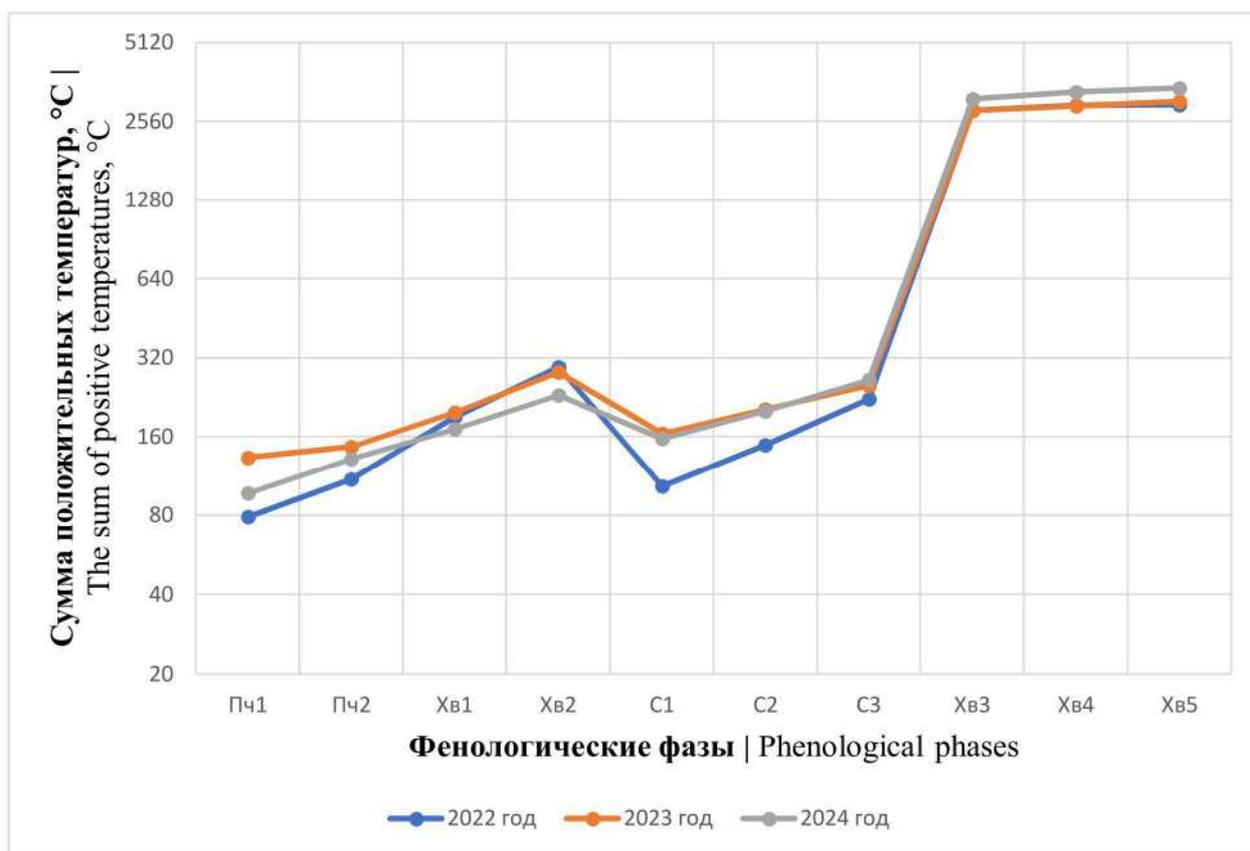


Рисунок 6. Зависимость наступления фенологических фаз от суммы положительных температур для лиственницы Любарского

Figure 6. The dependence of the onset of phenological phases in Lyubarsky's larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Распускание почек лиственницы Любарского наблюдалось в первой половине апреля (даты наступления фенофазы зафиксированы с 1 апреля 2024 г. по 9 апреля 2022 г.). Продолжительность цикла распускания хвои существенно варьировалась: в 2022 г., из-за более низких температур, процесс растянулся на 26 дней (полное охвоение наступило 7 мая), тогда как в 2024 г. период охвоения составил всего 10 дней и завершился 14 апреля. При-

мечательно, что в 2023 г., при сумме положительных температур, схожей с 2024 г., формирование хвои происходило медленнее и заняло 16 дней (окончилось 22 апреля). Процесс «цветения» занимал от 9 дней (в 2023 г.) до 15 дней (в 2022 г.). Формирование осенней окраски варьировалось от 24 сентября (2023 г.) до 7 октября (2022 г.). Полное опадение хвои происходило в период с 17 октября (2023 г.) по 6 ноября (2024 г.).

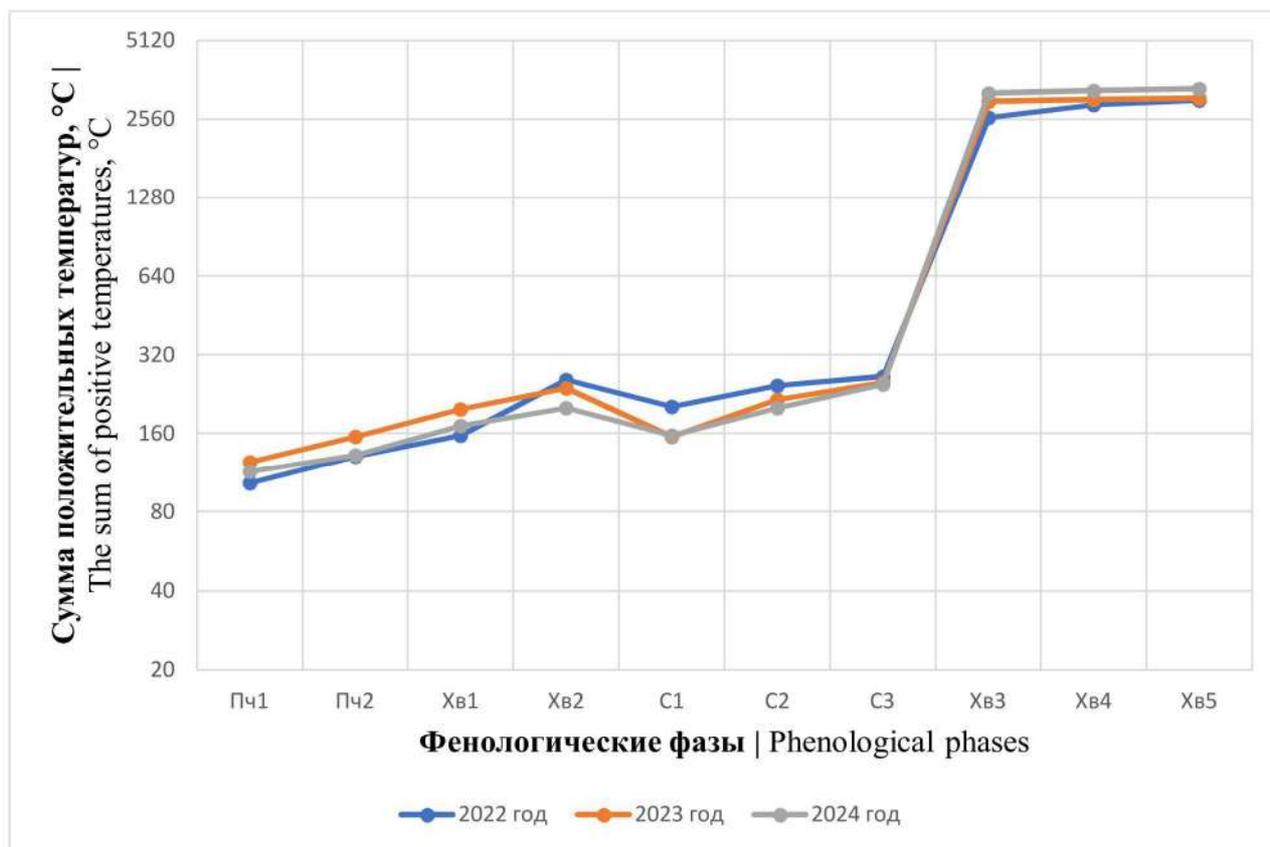


Рисунок 7. Зависимость наступления фенологических фаз от суммы положительных температур для лиственницы ольгинской

Figure 7. The dependence of the onset of phenological phases in Korean Dahurian larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Почки у лиственницы ольгинской (рис. 7) начинали набухать в начале-середине апреля. Весь процесс от набухания почек до полного охвоения длился от 9 до 19 дней в зависимости от того, насколько быстро накапливались суммы положительных температур. Появление стробил приходилось на период с 8 по 26 апреля, причем весь процесс «цветения» занимал всего 8-10 дней. Осенняя окраска хвои у лиственницы ольгинской начинала проявляться в 2022 г. 16 сентября, а в 2023 и 2024 гг. – только в октябре (9 и 3 октября соответственно).

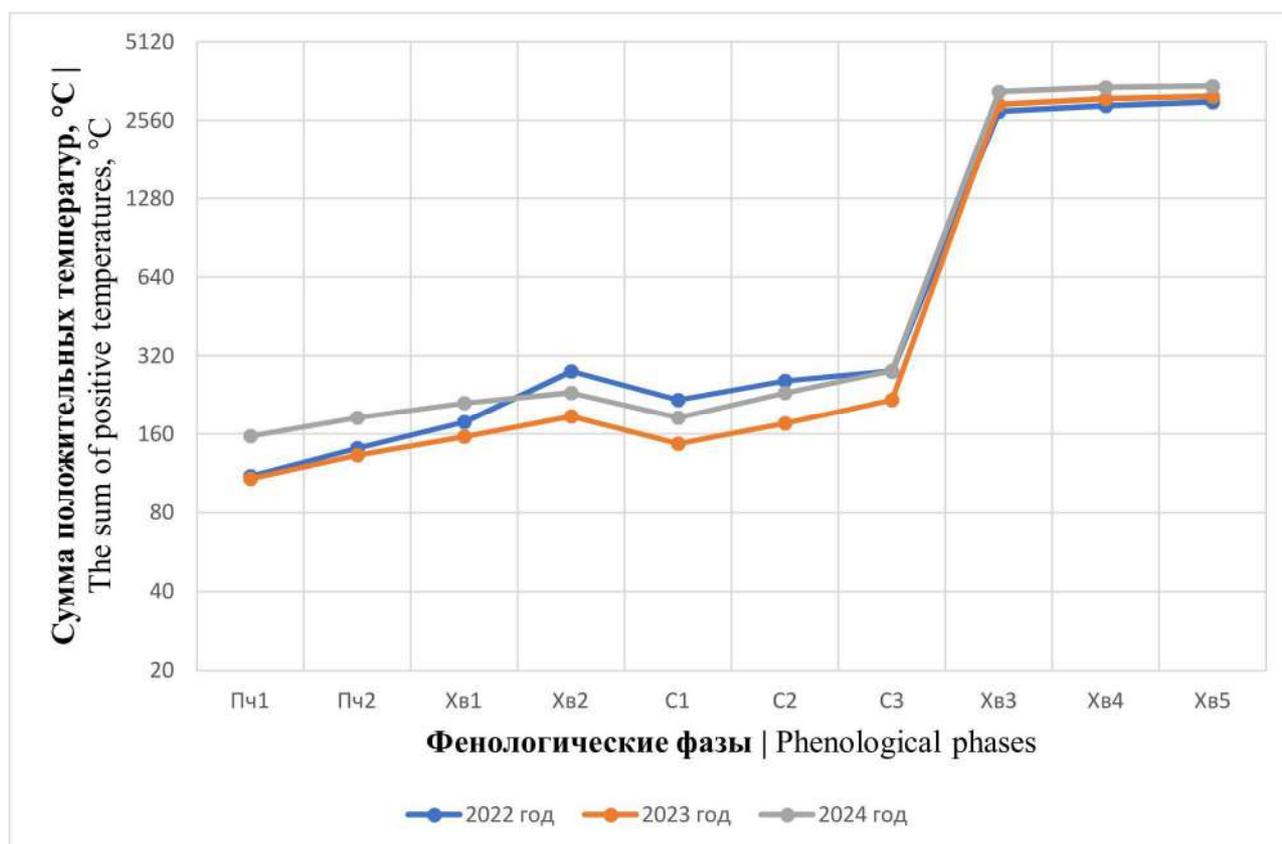


Рисунок 8. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы Потанина от суммы положительных температур

Figure 8. The dependence of the onset of phenological phases in Potanin's larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Длительность прохождения фенологических фаз при распускании хвои лиственницы Потанина (рис. 8) существенно различалась: в 2022 г. – 21 день, в 2023 г. – 9 дней, а в 2024 г. потребовалось всего 6 дней, чтобы пройти период от набухания почек до полного охвоения. Стоит отметить, что полное охвоение наступало в промежуток от 12 апреля (в 2023 г.) до 6 мая (в 2022 г.).

Формирование стробил варьировалось от 8 апреля (в 2023 г.) до 28 апреля (в 2022 г.). Завершение «цветения» приходилось на период с 16 апреля

(в 2023 г.) по 6 мая (в 2022 г.). Несмотря на различные сроки наступления фенологических фаз, общая продолжительность «цветения» оставалась примерно одинаковой – от 8 (в 2022 и 2023 гг.) до 10 дней (в 2024 г.).

Осенняя окраска хвои проявлялась в первой половине октября во всех исследуемых периодах, однако завершение листопада значительно различалось – от 20 ноября (в 2023 г.) до 14 декабря (в 2022 г.).

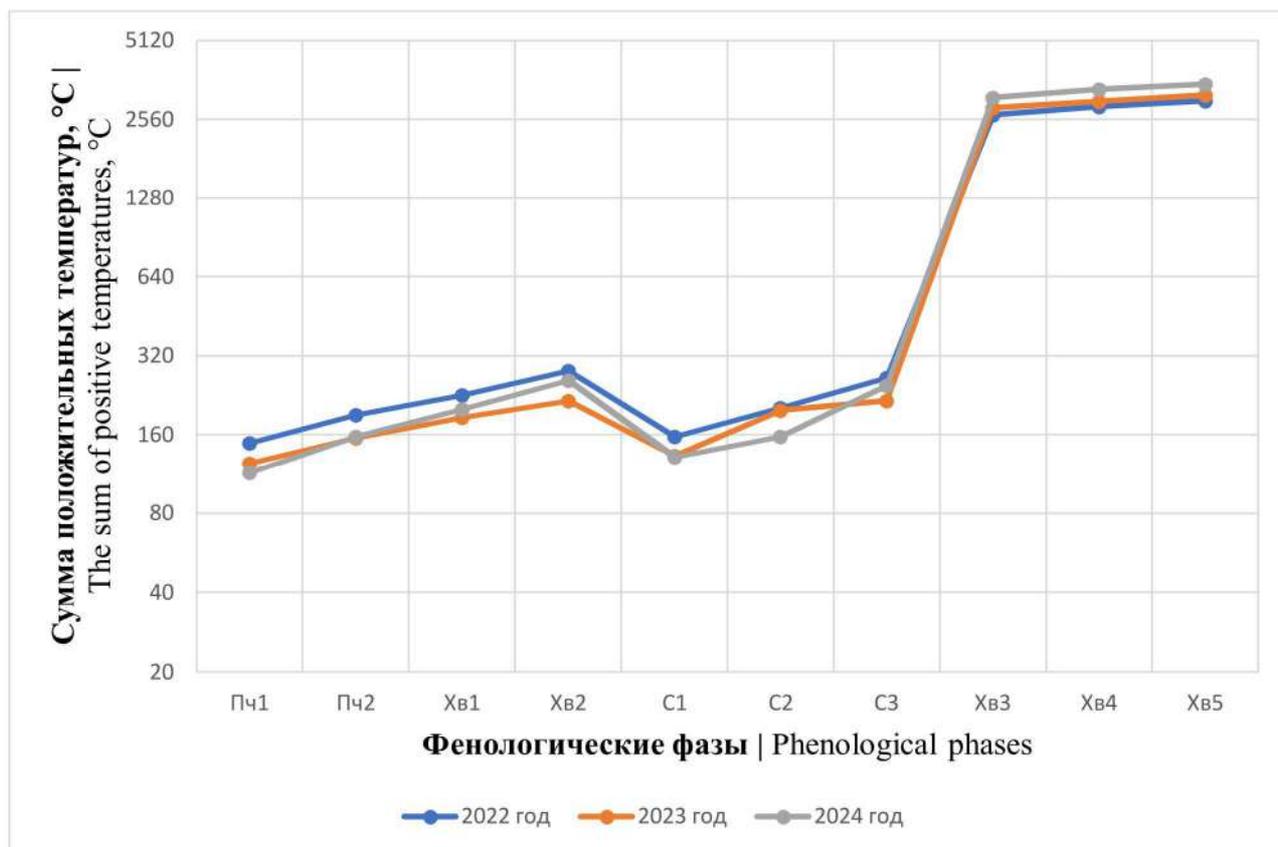


Рисунок 9. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы Сукачева от суммы положительных температур

Figure 9. The dependence of the onset of phenological phases in Sukachev's larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Набухание почек лиственницы Сукачева (рис. 9) в 2022 г. произошло 21 апреля при достижении суммы положительных температур значения 149 °С. В 2023 г. достаточным порогом оказалось преодоление отметки 125 °С (5 апреля), после чего у лиственницы Сукачева появились первые почки. В 2024 г. набухание почек наступило еще раньше – 2 апреля, когда сумма положительных температур составила 114°С. Период «цветения» составлял от 11

до 15 дней в исследуемые периоды. Формирование стробил у лиственницы Сукачева наблюдалось в период с 4 по 22 апреля. При этом во всех случаях цикл «цветения» длился 10-12 дней. Осенняя окраска хвои проявлялась в третьей декаде сентября, а опадание хвои происходило в промежутке от 18 ноября до 8 декабря.

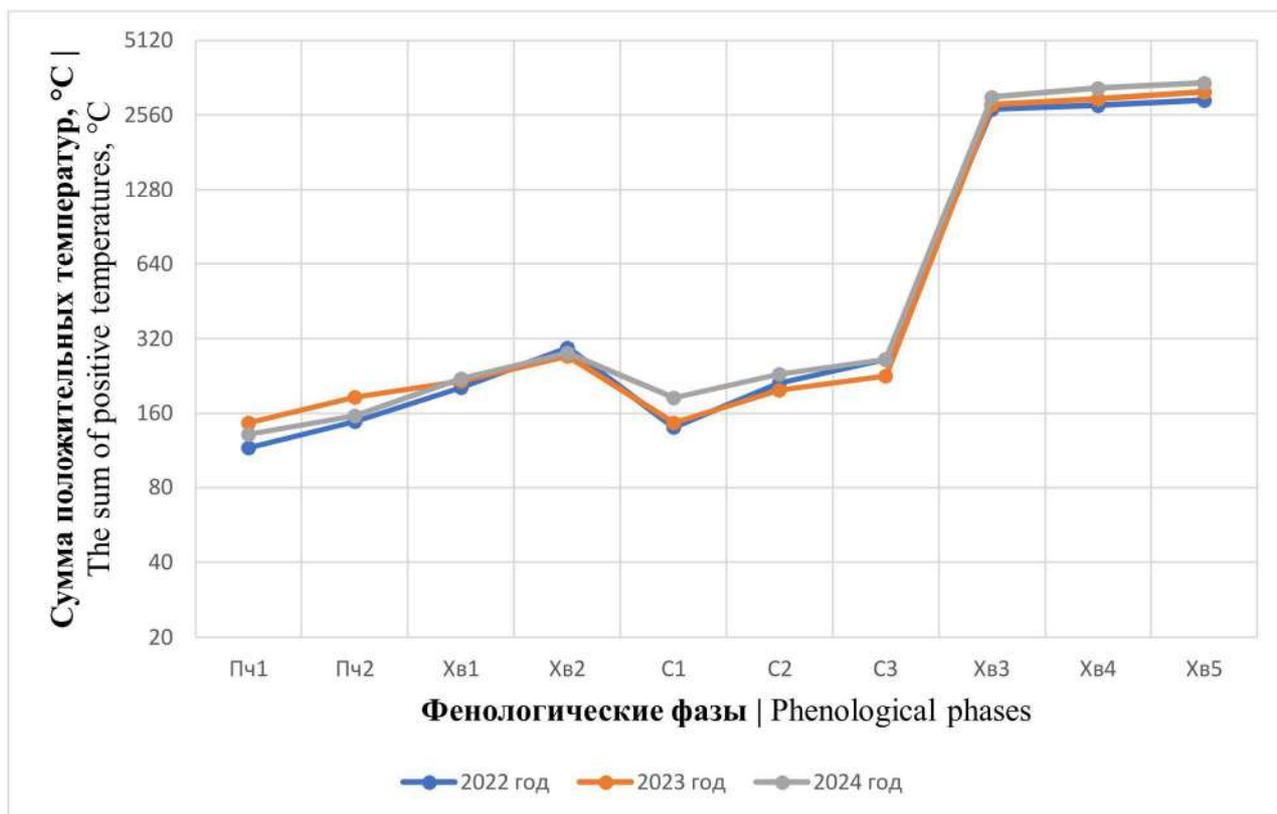


Рисунок 10. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы даурской от суммы положительных температур

Figure 10. The dependence of the onset of phenological phases in Dahurian larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Распускание хвои лиственницы даурской (рис. 10) длилось от 13 до 20 дней и приходилось на период с 4 апреля (зафиксировано в 2024 г.) по 17 апреля (в 2022 г.). Полное охвоение наблюдалось с 20 апреля (в 2024 г.) по 7 мая (в 2022 г.). «Цветение» проходило за 8-14 дней, начиналось с 8-20 апреля и

завершалось к 17 апреля-4 мая. Хвоя начинала обретать осеннюю окраску в 3 декаде сентября (во все исследуемые годы), а её опадение происходило в длительный промежуток – начиная с 27 октября (в 2022 г.) и завершаясь к 2 декабря (в 2023 г.).

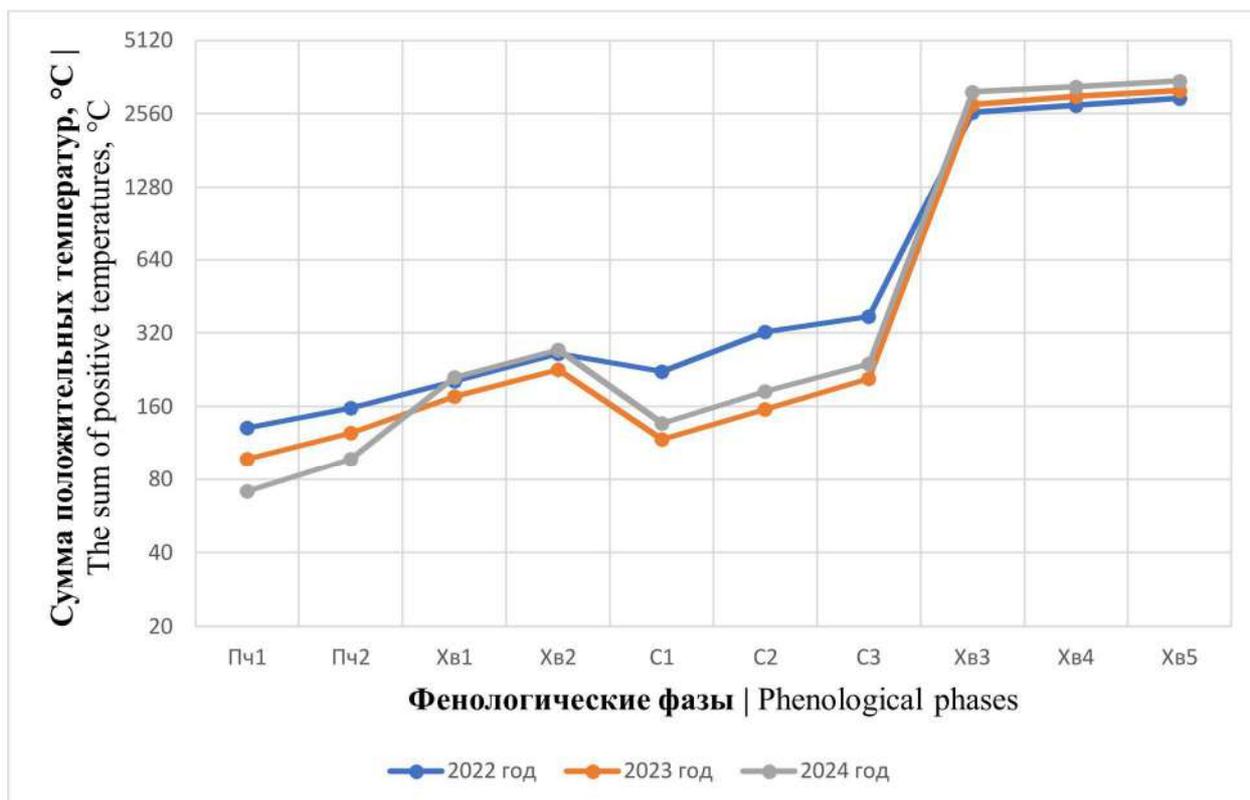


Рисунок 11. Зависимость наступления фенологических фаз у лиственницы сибирской от суммы положительных температур

Figure 11. The dependence of the onset of phenological phases in Siberian larch on the sum of positive temperatures

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Набухание почек лиственницы сибирской отмечалось при накоплении суммы положительных температур всего в 72 °С и произошло 30 марта 2024 г. Однако весь процесс охвоения занял длительный промежуток времени и составил 20 дней. В 2023 г. начало вегетации произошло при достижении показателем суммы положительных температур значения 98°С, набухание почек произошло 2 апреля с длительностью всех фаз охвоения в 15 дней. Однако в 2022 г. для начала вегетации потребовалось накопление суммы положительных температур в 131°С, и набухание почек состоялось только 19 апреля, при этом процесс охвоения занимал также 15 дней (как и в 2023 г.).

Накопленные суммы положительных температур при «цветении» (как видно на рисунке 12) также существенно различались: если в 2023-2024 гг. такой суммы температур (117-136 °С) было достаточно для начала цветения (начало «цветения»

отмечено 4 и 6 апреля соответственно), то в 2022 г. для появления стробил потребовалось больше накопленных температур, и процесс начался только 29 апреля.

Осенняя окраска хвои появлялась с 16 по 28 сентября. Окончание «листопада» происходило в период с 7 ноября (2022 г.) по 2 декабря (2024 г.).

В таблицах 1 и 2 представлены средние даты наступления фенологических фаз различных видов лиственниц. Взяты средние значения за период с 2022 по 2024 гг.

Таблица 1

Фенологический календарь сезонного развития видов лиственниц в ГБС РАН (распускание хвои, цветение)

Table 1

Phenological calendar of the seasonal development of larch species in the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (budding needles, flowering)

Вид species	30 марта March 30	2 апреля April 2	4 апреля April 4	6 апреля April 6	8 апреля April 8	10 апреля April 10	12 апреля April 12	14 апреля April 14	16 апреля April 16	18 апреля April 18	20 апреля April 20	22 апреля April 22	24 апреля April 24	26 апреля April 26	28 апреля April 28	30 апреля April 30	2 мая May 2	4 мая May 4
лиственница американская American larch																		
лиственница европейская European larch																		
лиственница сибирская Siberian larch																		
лиственница Сукачева Sukachev's larch																		
лиственница Любарского Lyubarsky larch																		
лиственница Потанина Potanin's larch																		
лиственница ольгинская Korean Daurian larch																		
лиственница курильская Kurile Daurian larch																		
лиственница даурская Daurian larch																		
лиственница Кемпфера Kempfer larch																		

Условные обозначения | Symbols:

Набухание почек buds swell	Распускание почек buds break	Развертывание хвои deployment of needles	Полное охвоение full deployment of needles
Начало появления стробил The beginning of the appearance of strobil	Массовое появление стробил The mass appearance of strobil	Окончание появления стробил The end of strobil's appearance	

Естественные науки и лес

При изучении процесса распускания почек (таблица 1) установлено, что наиболее раннее набухание наблюдается у лиственницы Любарского. При этом наиболее быстрое охвоение характерно для лиственниц Потанина и ольгинской, тогда как у лиственницы американской этот процесс происходит позднее остальных видов.

В среднем набухание почек начинается с 5 по 11 апреля, однако наблюдаются значительные отклонения от этих сроков. Так, самое раннее набухание почек было зафиксировано 30 марта (у лиственницы Кемпфера в 2023 г. и лиственницы сибирской в 2024 г.), а самое позднее - 21 апреля (у лиственницы Сукачева в 2022 г.).

Что касается фенофазы «цветения», то её начало раньше всего отмечается у лиственниц Любарского и Сукачева. При этом наиболее раннее

окончание «цветения» характерно для лиственницы европейской. Самые поздние сроки окончания формирования стробил зафиксированы у лиственницы Кемпфера.

В среднем период «цветения» длится с 11 апреля по 3 мая. Однако наблюдаются значительные отклонения: самое раннее начало цветения зафиксировано 4 апреля (у лиственницы сибирской в 2023 г. и лиственницы Сукачева в 2024 г.), а самое позднее окончание - 29 апреля (у лиственницы Кемпфера в 2022 г.).

Таким образом, фенологические фазы развития лиственниц характеризуются значительной вариабельностью сроков, что необходимо учитывать при проведении наблюдений и планировании практических мероприятий.

Естественные науки и лес

Таблица 2*

Фенологический календарь сезонного развития видов лиственниц в ГБС РАН (появление осенней окраски хвои, опадение хвои)†

Table 2*

Phenological calendar of seasonal development of larch species in the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (appearance of autumn color of needles, falling of needles)†

Вид species	Даты Dates												
	18 сентября September 18	22 сентября September 22	26 сентября September 26	30 сентября September 30	4 октября October 4	8 октября October 8	12 октября October 12	16 октября October 16	20 октября October 20	24 октября October 24	28 октября October 28	1 ноября November 1	
лиственница аме- риканская Ameri- can larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
лиственница евро- пейская European larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
лиственница си- бирская Siberian larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
лиственница Су- качева Sukachev's larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
лиственница Лю- барского Luybarsky larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
лиственница По- танина Potanin's larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
лиственница оль- гинская Korean Dahurian larch	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
	18 сентября September 18	22 сентября September 22	26 сентября September 26	30 сентября September 30	4 октября October 4	8 октября October 8	12 октября October 12	16 октября October 16	20 октября October 20	24 октября October 24	28 октября October 28	1 ноября November 1	5 ноября November 5
	9 ноября November 9	13 ноября November 13	17 ноября November 17	21 ноября November 21	25 ноября November 25	29 ноября November 29	2 декабря December 2	6 декабря December 6	10 декабря December 10				

Осенние фенофазы также имеют свои видовые особенности. Наиболее раннюю осеннюю окраску хвои демонстрирует лиственница Кемпфера, тогда как самая поздняя окраска наблюдается у лиственницы курильской. При рассмотрении процесса опадения хвои установлено, что этот процесс начинается раньше всего у лиственницы даурской, а позже всех - у лиственницы европейской. Полное опадение хвои раньше всего отмечается у лиственницы Любарского, а позже всех - у лиственницы европейской.

Важно отметить, что при анализе межвидовых различий в сезонном развитии наблюдается значительная вариабельность. Примечательно, что один и тот же вид лиственницы может демонстрировать существенные различия в длительности фенологических фаз в разные годы.

Заключение

В результате проведенных исследований были изучены фенологические фазы развития лиственниц американской, европейской, сибирской, Сукачева, Кемпфера, Любарского, Потанина и ольгинской в условиях г. Москвы.

Сравнительный анализ показал следующие закономерности. Распускание хвои начинается в период с 5 по 11 апреля (набухание почек) и завершается полным охвоением с 21 апреля по 2 мая. «Цветение» начинается с образования стробил с 11 по 19 апреля и заканчивается с 21 апреля по 3 мая. Осенняя окраска хвои появляется с 23 сентября по 7 октября. Полное опадение хвои происходит с 7 октября по 8 декабря. При этом были отмечены значительные межгодовые различия.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Фенологическое развитие различных видов лиственниц в условиях Москвы характеризуется определенной ритмичностью, при этом наблюдаются значительные межвидовые и межгодовые различия в сроках прохождения основных фаз развития.

2. Установлена четкая связь между накоплением положительных температур и началом фенологических фаз, что подтверждает ведущую роль температурного фактора в регуляции сезонного развития лиственниц.

3. Выявленная вариабельность сроков прохождения фенологических фаз указывает на высокую адаптивную способность лиственниц к меняющимся климатическим условиям урбанизированной среды.

4. Продолжительность фенофаз варьирует значительно: промежуток времени от набухания почек до полного охвоения может длиться от 6 (лиственница Потанина, 2024 г.) до 27 дней (лиственница американская, 2023 г.), а период цветения - от 6 (лиственница европейская, 2023 г.) до 18 дней (лиственница Кемпфера, 2023-2024 гг.).

5. Все исследованные виды успешно проходят полный сезонный цикл развития в условиях центра Европейской части России, что свидетельствует об их потенциальной пригодности для городского озеленения региона.

6. Полученные данные предельных значений сумм положительных температур при наступлении фенологических фаз имеют важное практическое значение для прогнозирования сроков вегетации и «цветения» различных видов лиственниц в условиях урбанизированной среды.

Таким образом, проведенные исследования не только позволили установить характерные сроки прохождения основных фенологических фаз у различных видов лиственниц в условиях Москвы, но и выявили важные закономерности их адаптивного поведения в урбанизированной среде, выражающиеся более ранним началом распускания хвои и появления стробил по сравнению с деревьями из естественных условий произрастания. Полученные результаты могут служить основой для оптимизации интродукции и использования лиственниц в городском озеленении, а также для прогнозирования их сезонного развития в условиях меняющегося климата.

Список литературы

1. Шемберг А.М., Третьякова И.Н. Исследование семенной продуктивности *Larix sibirica* и *Larix gmelinii* в Сибири // Хвойные бореальной зоны. – 2024. – Т. 42. - № 4. – С. 33-37. – DOI 10.53374/1993-0135-2024-4-33-37.

2. Антипин Н.А., Меркер В.В. Лиственницы даурские (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) в истории города Челябинска // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Социально-гуманитарные науки. – 2022. – Т. 22. – № 1. – С. 16-24. – DOI 10.14529/ssh220102.
3. Di X., Meng X., Wang M. Range-wide genetic diversity in natural populations of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. *Journal of Forestry Research*. 2021; 32 (1): 319-327. – DOI 10.1007/s11676-019-01085-7.
4. Мазаев С.А., Острошенко Л.Ю. Влияние стимуляторов роста на посевные качества семян лиственницы Комарова (*Larix x Komarovii* В. Kolesn.) // Аграрный вестник Приморья. – 2021. – № 2(22). – С. 72-76. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46625468>.
5. Sun Yu., Jin X., Pukkala T., Li F. Predicting Individual Tree Diameter of Larch (*Larix olgensis*) from UAV-LiDAR Data Using Six Different Algorithms. *Remote Sensing*. 2022; 14 (5): 1125. – DOI 10.3390/rs14051125.
6. Исаева Л.Г., Ершов В.В., Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А. Интродукция кедра и лиственницы в условиях Кольского Заполярья // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 4(394). – С. 41-57. – DOI 10.37482/0536-1036-2023-4-41-57.
7. Кузьмин С.Р., Рубцов А.В., Барченков А.П., Карпюк Т.В. Дифференциация климатипов лиственниц (*Larix spp.*) в географических культурах в лесостепи Средней Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2021. – № 56. – С. 170-188. – DOI 10.17223/19988591/56/8.
8. Аношкина Л.В., Рунова Е.М., Смолина Н.В. Фенологические наблюдения за древесными интродуцентами в г. Братске // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2022. – № 62. – С. 106-109. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49774591>
9. Козловский Б.Л., Куропятников М.В., Федоринова О.И. Фенология древесных интродуцентов Ботанического сада ЮФУ // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет, 2020. – 228 с. – ISBN 978-5-9275-3553-8. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44616967&ysclid=m9eqfqkh7a154459432>.
10. Димитриев А.В. Фенологические наблюдения в школьных лесничествах Чувашской Республики в осенне-зимний период // Экологический вестник Чувашской Республики. – 2021. – № 81. – С. 94-97. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67271260>.
11. Боровикова А.А., Антонов А.М. Сезонное развитие и качество семян видов рода *Larix* Mill. // Наукосфера. – 2022. – № 6-1. – С. 146-151. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49206080>.
12. Карбасникова Е.Б., Бабич Н.А., Карбасников А.А. Особенности сезонного развития лиственницы (*Larix* Mill.) в условиях южной подзоны тайги // Лесной вестник. *Forestry Bulletin*. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 53-59. – DOI 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59.
13. Антонов А.М., Боровикова А.А. Сезонное развитие коллекции *Pinaceae* Lindl дендросада имени И. М. Стратоновича // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2024. – № 4(44). – DOI 10.23649/JAE.2024.44.1.
14. Кищенко И.Т. Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесообразующих видов в таежной зоне (Карелия) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 3(375). – С. 72-82. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82.
15. Янцер О.В., Скок Н.В. Фенологические методы исследований в изучении динамики ландшафтов: общий обзор // Вестник Башкирск. ун-та. – 2016. – Т. 21. – № 1. – С. 91-100. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27672813>.
16. Древесные растения Главного ботанического сада им. Н. В. Цицина РАН: 60 лет интродукции / отв. ред. А. С. Демидов; Гл. ботан. сад им. Н. В. Цицина. – М.: Наука, 2005. – 586 с. Режим доступа: <http://nshhuman.ru/shipunov/biblbook.php?nbook=6265&ysclid=mamoh3as55889611056>.
17. Методика ведения фенологических наблюдений: Памяти основоположника русской фенологии Дмитрия Никифоровича Кайгородова (1846–1924) / Д.Р. Владимиров, А.А. Гладилин, А.Е. Гнеденко, А.И. Глухов, В.А. Грудинская, Н.С. Здравчев, П.А. Лебедев, А.А. Минин, И.В. Мироненко, С.А. Сенатор, К.А. Симакова, А.В. Тихомирова, М.Н. Шайкина, Л.Ю. Шипилина, А.Г. Ширяев, А.А. Юрманов, О.В. Янцер. – Санкт-Петербург:

Альпина ПРО, 2023. – 208 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hryvja&ysclid=m9fgw06vks503789660>

18. Рекомендации по унификации фенологических наблюдений в России / А.А. Минин, А.А. Ананин, Ю.А. Буйволлов, Е.Г. Ларин, П.А. Лебедев, Н.В. Поликарпова, И.В. Прокошева, М.И. Руденко, И.И. Сапельникова, В.Г. Федотова, Е.А. Шуйская, М.В. Яковлева, О.В. Янцер // *Nature Conservation Research. Заповедная наука.* – 2020. – Т. 5. - № 4. – С. 89-110. – DOI 10.24189/ncr.2020.060.

19. 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 10.18619/2072-9146-2020-6-77-84.

20. Лазарева О.Н., Моисеева Л.В., Вуколова Е.Г. Фенологические наблюдения: ритмы в природе. – Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет, 2017. – 212 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rovprnv&ysclid=m9fh4yju2m879095447>

21. Соловьева В.В. Фенонаблюдения за древесно-кустарниковыми растениями как средство формирования исследовательских умений учащихся // *Самарский научный вестник.* – 2020. – Т. 9.- № 1(30). – С. 273-277. – DOI 10.17816/snv202091310.

References

1. Shemberg A.M., Tretyakova I.N. *Issledovanie semennoy produktivnosti Larix sibirica i Larix gmelinii v Sibiri* [Study of seed productivity of *Larix sibirica* and *Larix gmelinii* in Siberia]. *Khvoynye boreal'noy zony= Conifers of the boreal zone.* 2024; 42 (4): 33-37. DOI 10.53374/1993-0135-2024-4-33-37. (In Russ.).

2. Antipin N.A., Merker V.V. *Listvennitsy daurskie (Larix gmelinii (Rupr.) Rupr.) v istorii goroda Chelyabinsk* [Daurian larches (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) in the history of the city of Chelyabinsk]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sotsial'no-gumanitarnye nauki = Bulletin of the South Ural State University. Series: Social and Humanitarian Sciences.* 2022; 22 (1): 16-24. DOI 10.14529/ssh220102. (In Russ.).

3. Di X., Meng X., Wang M. Range-wide genetic diversity in natural populations of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. *Journal of Forestry Research.* 2021; 32 (1): 319-327. DOI 10.1007/s11676-019-01085-7.

4. Mazaev S.A., Ostroshenko L.Yu. *Vliyaniye stimulyatorov rosta na posevnye kachestva semyan listvennitsy Komarova (Larix x Komarovii B. Kolesn.)* [The effect of growth stimulators on the sowing qualities of Komarov larch seeds (*Larix x Komarovii B. Kolesn.*)]. *Agrarnyy vestnik Primor'ya = Agrarian Bulletin of Primorye.* 2021; 2(22): 72-76. (In Russ.).

5. Sun Yu., Jin X., Pukkala T., Li F. Predicting Individual Tree Diameter of Larch (*Larix olgensis*) from UAV-LiDAR Data Using Six Different Algorithms. *Remote Sensing.* 2022; 14 (5): 1125. DOI 10.3390/rs14051125.

6. Isaeva L.G., Ershov V.V., Urbanavichyus G.P., Borovichev E.A. *Introduktsiya kedra i listvennitsy v usloviyakh Kol'skogo Zapolyar'ya* [Introduction of cedar and larch in the conditions of the Kola Arctic]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal= News of higher educational institutions. Forest Magazine.* 2023; 4(394): 41-57. DOI 10.37482/0536-1036-2023-4-41-57. (In Russ.).

7. Kuz'min S.R., Rubtsov A.V., Barchenkov A.P., Karpyuk T.V. *Differentsiatsiya klimatipov listvennits (Larix spp.) v geograficheskikh kul'turakh v lesostepi Sredney Sibiri* [Differentiation of climatypes of larches (*Larix* spp.) in geographical cultures in the forest-steppe of Central Siberia]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Bulletin of Tomsk State University. Biology.* 2021; 56: 170-188. DOI 10.17223/19988591/56/8. (In Russ.).

8. Anoshkina L.V., Runova E.M., Smolina N.V. *Fenologicheskie nablyudeniya za drevesnymi introdutsentami v g. Bratske* [Phenological observations of tree introducers in Bratsk]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa= Actual problems of the forest complex.* 2022; 62: 106-109. (In Russ.).

9. Kozlovskiy B.L., Kuropyatnikov M.V., Fedorinova O.I. Phenology of Arboreal Introducers of the SFU Botanical Garden. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Southern Federal University. Rostov-on-Don – Taganrog: Southern Federal University, 2020. 228 p. (In Russian).

10. Dimitriev A.V. *Fenologicheskie nablyudeniya v shkol'nykh lesnichestvakh Chuvashskoy Respubliki v osemnezimniy period* [Phenological observations in school foresters of the Chuvash Republic in the autumn-winter period]. *Ekologicheskiy vestnik Chuvashskoy Respubliki = Ecological Bulletin of the Chuvash Republic*. 2021; 81: 94-97. (In Russ.).
11. Borovikova A.A., Antonov A.M. *Sezonnoe razvitiye i kachestvo semyan vidov roda Larix Mill.* [Seasonal development and seed quality of species of the genus Larix Mill.]. *Naukosfera = The science sphere*. 2022; 6-1: 146-151. (In Russ.).
12. Karbasnikova E.B., Babich N.A., Karbasnikov A.A. *Osobennosti sezonnogo razvitiya listvennitsy (Larix Mill.) v usloviyakh yuzhnoy podzony taygi* [Features of seasonal development of larch (Larix Mill.) in the southern taiga subzone]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2020; 24 (3): 53-59. DOI 10.18698/2542-1468-2020-3-53-59. (In Russ.).
13. Antonov A.M., Borovikova A.A. *Sezonnoe razvitiye kolleksii Pinaceae Lindl dendrosada imeni I.M. Stratonovicha* [Seasonal development of the Pinaceae Lindl collection at the I.M. Stratonovich Arboretum]. *Journal of Agriculture and Environment*. 2024; 4(44). DOI 10.23649/JAE.2024.44.1. (In Russ.).
14. Kishhenko I.T. *Vlijaniye klimaticheskikh faktorov na sezonnoe razvitiye hvoynnykh lesobrazujushhih vidov v taezh-noj zone (Kareliya)* [Influence of climatic factors on the seasonal development of coniferous forest-forming species in the taiga zone (Karelia)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoj zhurnal = News of higher educational institutions. Forest Magazine*. 2020; 3(375): 72-82. DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82. (In Russ.).
15. Jancer O.V., Skok N.V. *Fenologicheskie metody issledovaniy v izuchenii dinamiki landshaftov: obshhiy obzor* [Phenological research methods in the study of landscape dynamics: a general overview]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta = Bulletin of the Bashkir University*. 2016; 21 (1): 91-100. (In Russ.).
16. Woody plants of the N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences: 60 years of introduction / ed. by A. S. Demidov; N. V. Tsitsin Main Botanical Garden, Moscow: Nauka Publ., 2005. 586 p. (In Russ.).
17. Vladimirov D.R., Gladilin A.A., Gnedenko A.E., Gluhov A.I., Grudinskaja V.A. et al. *Methods of conducting phenological observations: In memory of Dmitry Nikiforovich Kaigorodov (1846-1924), the founder of Russian phenology*. Saint-Petersburg: Al'pina PRO, 2023. 208 p. (In Russ.).
18. Minin A.A., Ananin A.A., Bujvolov Ju.A., Larin E.G., Lebedev P.A. et al. *Rekomendacii po unifikacii fenologicheskikh nabljudeniy v Rossii* [Recommendations for the unification of phenological observations in Russia]. *Zapovednaya nauka = Nature Conservation Research*. 2020; 5 (4): 89-110. DOI 10.24189/ncr.2020.060. (In Russ.).
19. Yemelyanova O.Yu., Tsoi M.F., Masalova L.I. *Fenologicheskie nabljudeniya kak osnova formirovaniya bazy dannykh fenospektrov drevesnykh rasteniy* [Phenological observations as the basis for the formation of a database of woody plant phenomena]. *Ovoshhi Rossii = Vegetables of Russia*. 2020; 6: 77-84. DOI 10.18619/2072-9146-2020-6-77-84. (In Russ.).
20. Lazareva O.N., Moiseeva L.V., Vukolova E.G. *Phenological observations: rhythms in nature*. Yekaterinburg: Ural State Pedagogical University, 2017. 212 p. (In Russ.).
21. Solovyova V.V. *Fenonabljudeniya za drevesno-kustarnikovymi rasteniyami kak sredstvo formirovaniya issledovatel'skiykh umeniy uchashhihsya* [Phenological observations of arboreal and shrubby plants as a means of forming students' research skills]. *Samarskiy nauchnyy vestnik = Samara Scientific Bulletin*. 2020; 9 (1(30)): 273-277. DOI 10.17816/snv202091310. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ Лавренов Максим Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ЛТ1-МФ. Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Служ. адрес: 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д.1., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>, e-mail: lavrenov@mgul.ac.ru.

Естественные науки и лес

Котов Алексей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры ЛТ1-МФ. Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Служ. адрес: 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д.1, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906> E-mail: kotov@mgul.ac.ru.

Брынцев Владимир Альбертович - доктор сельскохозяйственных наук, доцент, главный научный сотрудник ГБС РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>, e-mail: bryntsev@mail.ru.

Рысин Сергей Львович - кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией ГБС РАН, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6635-3114>, e-mail: ser-rysin@yandex.ru.

Коженкова Анна Альбертовна - кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, научный сотрудник ГБС РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165> e-mail: kozhenkovaa@yandex.ru.

Information about authors

✉ *Maxim A. Lavrenov* – Cand. Sc. (Agriculture), associate professor of the department LT-1, BMSTU (Mytishchi branch), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>, e-mail: lavrenov@mgul.ac.ru.

Alexey A. Kotov – Dr. Sci. (Technical), Prof. of the department LT-1 BMSTU (Mytishchi branch), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0136-2906>, e-mail: kotov@mgul.ac.ru.

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

Sergey L. Rysin – Cand. Sci. (Biological), associate professor, leading researcher, Head of the Laboratory of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6635-3114>, e-mail: ser-rysin@yandex.ru.

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

✉ - Для контактов/Corresponding

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/6>

УДК: 630.181.633:582.475.2:547.913



**Влияние гидротехнической мелиорации и особенностей развития
ассимиляционных аппаратов деревьев сосны обыкновенной
(*Pinus sylvestris* L.) на выделение ими терпентина**

Анатолий С. Новосёлов¹ ✉, AnSer-Rock-Bard@mail.ru, 0000-0002-6907-0424

Олег С. Попов², popovoleg81@gmail.com, 0000-0003-2464-1729

¹ ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, 160000, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, 2, с. Молочное, гор. округ г. Вологда, 160555, Российская Федерация

Аннотация

В сосновых древостоях на болотно-торфяных почвах изучено влияние некоторых фенотипических показателей деревьев (типа доминирования ветвистости и величины раскидистости ассимиляционных аппаратов) на выделение терпентина при их опытной подсочке. Впервые публикуется усовершенствованная авторская методика учёта ассимиляционных аппаратов и румбовая классификация крон деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753), которая рекомендуется к применению в рамках ускоренного отбора деревьев с повышенной терпено-продуктивностью в прижизненное пользование подсочкой. Полученные данные подтверждают возможность использования осушенных лесных земель и лесоводственных уходов в целях проведения прижизненного использования сосновых лесов. Многолетнее исследование проведено в Вологодской области (Сокольский муниципальный округ), на территории гидролесомелиоративного фонда (на осушенной его части). Лесные опытные объекты были представлены двумя типами: только осушаемые, а также осушаемые и пройденные лесоводственным уходом сосновые древостои. В фитоценозах проведены лесоводственно-таксационные исследования с определением и вычислением стандартных показателей. Установлено положительное влияние на выделение соснового терпентина лесоводственного ухода «проходные рубки ухода», по сравнению с мелиорируемым древостоем без ухода – на 5 %. Изучение степени ветвистости крон деревьев по сторонам света позволило сделать вывод о том, что наиболее интенсивное выделение терпентина при подсочке характерно сосновым деревьям с более развитыми кронами на ЮЗ, ЮВ и СЗ румбах. Выявлено, что наибольшими способностями по образованию и выделению сосновой пасоки в осушаемых условиях обладают узко-кронные деревья (выделение пасоки (средний потёк деревьев с узкими кронами 66 см) в среднем больше на 24 %) несмотря на то, что в пологе преобладают широко-кронные сосны (средний потёк терпентина – 53 см). Поиск связи между выделением терпентина при подсочке и таксационными диаметрами импактных деревьев позволил прийти к выводу, что в большинстве случаев уровень связи зафиксирован отрицательным.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, классификация крон, торфяная почва, гидротехническая мелиорация, сосновый терпентин (*живица*), ассимиляционный аппарат

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: Новосёлов, А. С. Влияние гидротехнической мелиорации и особенностей развития ассимиляционных аппаратов деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на выделение ими терпентина / А. С. Новосёлов, О. С. Попов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 88-106. – Библиогр.: с. 102-105 (21 назв.). – DOI: DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/6>.

Поступила 07.02.2025. **Пересмотрена** 08.04.2025. **Принята** 26.05.2025. **Опубликована онлайн** 26.06.2025.

Article

The impact of hydroengineering reclamation and the development characteristics of the assimilation apparatus of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on its turpentine emission

Anatoly S. Novoselov¹ ✉, AnSer-Rock-Bard@mail.ru,  0000-0002-6907-0424

Oleg S. Popov², popovoleg81@gmail.com,  0000-0003-2464-1729

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

²*FSBEI HE Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, 2 Schmidt St., Molochnoye, Vologda Urban Okrug, 160555, Russian Federation*

Abstract

The study examined the effect of certain phenotypic tree characteristics (such as branching dominance type and the spread of assimilatory apparatus) on turpentine yield during experimental resin tapping in pine stands growing on drained peat soils. For the first time, an improved author-developed method for assessing assimilatory apparatus and a compass-based classification of Scots pine (*Pinus sylvestris* L., 1753) crown shapes are presented, recommended for use in accelerated selection of trees with increased terpene productivity for lifetime resin extraction. The obtained data confirm the feasibility of utilizing drained forest lands and silvicultural treatments for the sustainable lifetime use of pine forests. The long-term study was conducted in the Vologda region (Sokolsky municipal district), within a hydro-forest reclamation area (drained section). The experimental forest sites included two types: drained-only stands and drained stands subjected to silvicultural thinning. Phytocenotic and forest inventory studies were carried out, with standard indicators determined and calculated. A positive effect of thinning (intermediate cuttings) on pine turpentine yield was observed, showing a 5% increase compared to drained stands without management. An analysis of crown branching density by cardinal directions revealed that the most intensive turpentine production during tapping was characteristic of pine trees with more developed crowns on SW, SE, and NW compass points. It was found that narrow-crowned trees exhibited the highest sap production capacity under drained conditions (average resin flow in narrow-crowned trees: 66 cm, 24% higher than average), despite the predominance of broad-crowned pines in the canopy (average resin flow: 53 cm). An investigation into the relationship between resin yield and inventory diameters of sampled trees indicated a predominantly negative correlation.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., Scots pine, crown classification, peat soil, hydroengineering reclamation, pine turpentine (oleoresin), assimilation apparatus

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Novoselov A.S., Popov O.S. (2025). The impact of hydroengineering reclamation and the development characteristics of the assimilation apparatus of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on its turpentine emission. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 88-106 (in Russian). DOI: DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/6>.

Received 07.02.2025. *Revised* 08.04.2025. *Accepted* 26.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Сосновый терпентин (от лат. *terebinthina*) – это натуральное ценное лесохимическое сырьё (или живица), выделяющееся при нанесении поранений на стволы деревьев и представляющее собой сложное соединение, состоящее из смоляных кислот (62 – 65 %) и жидких терпеновых углеводородов (35 – 38 %). Образующаяся пасока убивает инфекции и дендро-фильных насекомых (фитонцидное действие), заживляя механические повреждения на деревьях (как отмечают П. А. Красочко и др. (2021) [1], Штрахов С. Н. и др. (2024) [2], F. Aloui и др. (2022) [3], X. Ding и др. (2023) [4], N. Garcia-Fornier и др. (2021) [5], M. L. Gaylord и др. (2007) [6]). По данным исследований Н. А. Дружинина и Ф. Н. Дружинина (2024) [7], А. С. Новосёлова и В. П. Уханова (2020) [8], О.С. Попова (2024) [9], M. L. Gaylord и др. (2007) [6], C. Vazquez-Gonzalez и др. (2020) [10], A. Zaluma и др. (2022) [11] важно отметить, что способность деревьев сосны выделять при поранениях терпентин – это также прямой указатель на их жизнестойкость.

Согласно положениям лесного кодекса добыча терпентина из сосновых насаждений расположена на втором месте в иерархическом списке, сразу же за заготовкой спелой и перестойной древесины. Получаемый лесохимический продукт продолжает оставаться важным звеном в комплексной лесной продукции, даже несмотря на то, что объём заготавливаемого терпентинового сырья в России снизился до критически низких отметок (по мнению С. Vazquez-Gonzalez и др. (2020) [10], A. Zaluma и др. (2022) [11]). В наибольшей степени рационализировать использование необходимо на лесистых территориях анаэробных и искусственно-дренируемых условиях. Необходимо добиться улучшения структуры насаждений, углеродного баланса, сохранения биоразнообразия и реализовать принципы эффективного управления этих земель (отмечено В. И.

Желдаком (2020) [12], В. В. Пахучим и Л. М. Пахучей (2021) [13], Т.И. Пономаревой (2022) [14]. Отыскание путей расширения лесосырьевой базы для осуществления подсосных мероприятий – это основа планирования в многоцелевом использовании лесов, в особенности, при прижизненной их эксплуатации. Поэтому осушительная мелиорация и лесные объекты, входящие в гидро-лесомелиоративный фонд, – это один из надёжных путей расширения лесных площадей, потенциально пригодных для заготовки соснового терпентина. Также исследованиями установлено положительное влияние во многих аспектах осушения болотных земель на состояние сосновых фитоценозов предварительной и последующей генераций.

Проектирование лесоводственных мероприятий при подготовке «лесов будущего» на гидроресомелиоративных системах, в особенности в аспекте их влияния на терпено-продуктивность сосняков, трудно переоценить. В этом контексте следует выделить необходимость лесоводственных уходов на осушенных лесных землях ввиду того, что они приводят к увеличению энергии роста, по мнению Н. А. Дружинина и др. (2023) [15], то есть к усилению объёмного прироста.

Открытыми остаются научные вопросы, связанные с влиянием на терпено-продуктивность ряда признаков у сосновых деревьев (*Pinus sylvestris* L., 1753), таких, как таксационный диаметр штамба, форма и степень ветвистости кроны, высота поднятия грубой корки в условиях болотно-торфяных почв после проведения осушительной мелиорации. Исследования в этом отношении достаточно малочисленны. Стоит также отметить возникшие за последние годы технические усовершенствования, применяемые при получении терпентина, в том числе со спиленных деревьев (как отмечали V. Gurau и др. (2021) [16]). Таким образом, резюмируя отмеченные выше аспекты, была изложена *цель*

проведённого исследования – в Сокольском муниципальном округе Вологодской области на основе улучшенной методики по изучению разнообразия крон сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) по их ветвистости в различные стороны горизонта провести установление тенденции образования и выделения терпентина при нанесении микро-ранений в рамках опытной многолетней подсочки в древостоях на искусственно-дренируемых болотно-торфяных почвах. В ходе достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

➤ усовершенствовать и в достаточной степени апробировать авторскую Румбовую классификация крон деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) для решения круга научных вопросов, связанных с образованием и выделением терпентина при опытной подсочке;

➤ получить достоверные данные о влиянии особенностей развитости ассимиляционных аппаратов (экспозиция) у сосновых деревьев на терпено-выделение при нанесении поранений;

➤ на искусственно-дренируемых, а также на искусственно-дренируемых и пройденных лесоводственным уходом лесных землях выявить особенности терпено-выделения при опытной подсочке закрытого типа в течение пятилетнего срока проведения эксперимента;

➤ изучить особенности выделения терпентина у сосны обыкновенной в течение летнего диапазона вегетации;

➤ установить взаимосвязь между таксационными диаметрами импактных деревьев и величинами потёков терпентина.

Материалы и методы

Методика исследования. Основные лесоводственные площадки (постоянные пробные площади (ППП)) своими длинными сторонами отграничивались параллельно регулирующим каналам мелиоративной сети (по данным Н. А. Дружинина, Ф. Н. Дружинина (2021) [17], А. С. Новосёлова и В. П. Уханова (2020) [8], С. Г. Шурыгина и др. (2023) [18]) в центре межканальной полосы (МК) и вблизи осушительных каналов (ПК). Для древостоев, с помощью лесотаксационных работ, устанавливались базовые показатели (табл. 1), исходя из исчисления

сумм площадей поперечных сечений штаббов деревьев на высоте 1,3 м. Учитывались хвойный под-рост, подлесочные породы и живой напочвенный покров согласно общепринятым методикам в лесоводстве (согласно данным исследований Н. А. Дружинина и Ф. Н. Дружинина (2024) [7, 19], Л. М. Пахучей и В. В. Пахучего (2023) [20]). Степень репрезентативности видов растений в травяно-кустарничковом и мохово-лишайниковом ярусах оценивалась по шкале обилия Друде. Исследование проводилось на площадках 2 • 2 или 1 • 1 м в границах пробных площадей (учёт велся в середине июля).

Получение соснового терпентина проводилось путём экспериментальной подсочки при высверливании равновеликих отверстий (Ø 5 мм, глубина 15 мм) на стволах деревьев с последующей установкой в них прозрачных трубок ПВХ (поливинилхлорид) – спиральное опутывание с углом под-нятия в 45° соблюдалось, чтобы избежать образования воздушных пузырей, длиной от 100 до 150 м (закрытый метод подсочки). Верхние концы трубок фиксировались в грубой корке с помощью игл. Предварительно штаббы деревьев готовились в виде удаления на высоте 1,3 м грубой корки двуручным стругом. После прохождения одних суток в трубках ПВХ замерялись длины потёков терпентина с точностью измерения до 1 мм. Установление специфики терпено-выделения проводилось при под-боре в эксперимент не менее 40 деревьев на каждой ППП.

Индивидуальный учёт форм крон сосновых деревьев (узко- и широко-кронные (по данным О.Н. Тюкавиной (2021) [21]) и степень развитости (или ветвистости) ассимиляционных аппаратов проводились при помощи специально разработанной методики (автор А.С. Новосёлов) и румбовой кодификации крон (*Pinus sylvestris* L., 1753), показанной на рис. 1 – 3. Применение классификации сводится к тому, что необходимо максимально близко подойти к стволу дерева. При этом правую руку туловища нужно расположить в направлении восточной стороны горизонта (с помощью компаса или гаджета с опцией установления экспозиции), при этом взгляд должен быть направлен на север (рис. 1). Удобнее зарисовывать контуры проекции кроны на бумаге,

не прибегая к условностям в обозначениях. В дальнейшем, в камеральных условиях, кроне каждого дерева присваивается индивидуальный шифр на основании основной классификации. Вначале прописывается румб, для которого была отмечена наибольшая ветвистость кроны (чёрный колер на схеме). В дальнейшем указываются румбы по мере убывания раскидистости кроны дерева, для других четвертей румбовой крестовины.

Разбор индивидуального кода: СВ > СЗ > ЮЗ.

Наибольшая раскидистость кроны дерева отмечена в направлении СВ, несколько меньшая на – СЗ и самая малая доля ветвистости – на ЮЗ направлении (Индивидуальный код – СВ-5). В вариантах, когда ассимиляционный дерева аппарат имеет вытянутую проекцию, в виде эллипса или прочих специфичных форм, применяется вспомогательная классификация крон на рис. 3. Порядок составления индивидуального шифра идентичен выше отмеченному алгоритму (пример: СВ Энс-5).

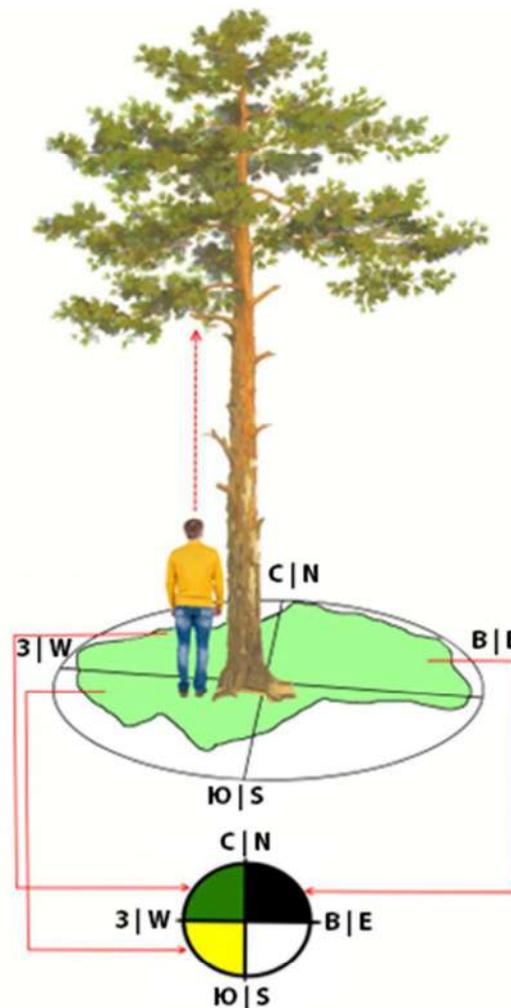


Рисунок 1. Порядок зарисовки кроны дерева при проецировании для установления индивидуального кода

Figure 1. The order of sketching the tree crown when projecting to establish an individual code
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Естественные науки и лес

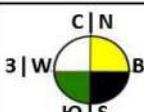
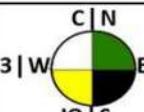
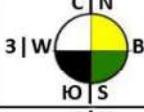
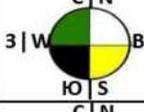
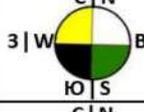
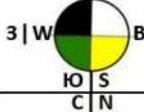
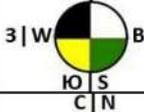
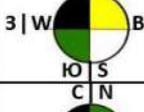
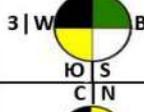
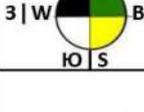
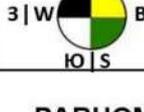
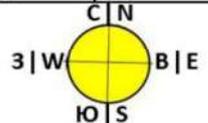
CB-1 NE-1		CB>ЮB>C3 NE>SE>NW	CB-2 NE-2		CB>C3>ЮB NE>NW>SE
CB-3 NE-3		CB>ЮB>Ю3 NE>SE>SW	CB-4 NE-4		CB>Ю3>ЮB NE>SW>SE
CB-5 NE-5		CB>C3>Ю3 NE>NW>SW	CB-6 NE-6		CB>Ю3>C3 NE>SW>NW
ЮB-1 SE-1		ЮB>CB>C3 SE>NE>NW	ЮB-2 SE-2		ЮB>C3>CB SE>NW>NE
ЮB-3 SE-3		ЮB>Ю3>CB SE>SW>NE	ЮB-4 SE-4		ЮB>CB>Ю3 SE>NE>SW
ЮB-5 SE-5		ЮB>Ю3>C3 SE>SW>NW	ЮB-6 SE-6		ЮB>C3>Ю3 SE>NW>SW
Ю3-1 SW-1		Ю3>C3>CB SW>NW>NE	Ю3-2 SW-2		Ю3>CB>C3 SW>NE>NW
Ю3-3 SW-3		Ю3>ЮB>CB SW>SE>NE	Ю3-4 SW-4		Ю3>CB>ЮB SW>NE>NW
Ю3-5 SW-5		Ю3>C3>ЮB SW>NW>SE	Ю3-6 SW-6		Ю3>ЮB>C3 SW>SE>NW
C3-1 NW-1		C3>Ю3>ЮB NW>SW>SE	C3-2 NW-2		C3>ЮB>Ю3 NW>SE>SW
C3-3 NW-3		C3>Ю3>CB NW>SW>NE	C3-4 NW-4		C3>CB>Ю3 NW>NE>SW
C3-5 NW-5		C3>CB>ЮB NW>NE>SE	C3-6 NW-6		C3>ЮB>CB NW>SE>NE
P U		РАВНОМЕРНАЯ (Uniform crown)			

Рисунок 2. Основная классификация крон
Figure 2. The main classification of tree crowns

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

При обработке рядов эмпирических данных полевых исследований применялась статистическая обработка в виде стандартных трёх видов анализа (вариационный, корреляционный и регрессионный анализы). Использовалось программное обеспечение MS Excel (2019) – встроенный пакет анализа. Для выявления уровня доверия к результатам сравнения величин применялся критерий Стьюдента (Госсета).

Крона эллипсообразная, непропорциональная Ellipsoidal, disproportionate crown			
	Эн В Ed E		Эн З Ed W
	Эн С Ed N		Эн Ю Ed S
Крона эллипсообразная, пропорциональная Ellipsoidal, proportional crown			
	Эп С-Ю Er N-S		Эп З-В Er W-E
Крона эллипсообразная, непропорциональная, сложная Ellipsoidal, disproportionate, complex crown			
	Эн + указывается шифр по основной классификации, СВ-1. Окончательная формула - Эн СВ-1 (Edc) + the code according to the main classification is indicated NE-1. The final formula - Edc NE-1		
Крона эллипсообразная, румбовая Ellipsoidal, rhomboidal crown			
	Эр + прописывается шифр по основной классификации, СЗ-6. Окончательная формула - Эр СЗ-6 Er + the code is written according to the main classification, NW-6 final formula - Er NW-6		

Рисунок 3. Вспомогательная классификация крон

Figure 3. Auxiliary classification of tree crowns
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Характеристика объектов исследования.

Древостой на лесных опытных объектах (табл. 1) представлены доминирующей сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) с незначительным участием в составе ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H. Karst., 1881) и берёзы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh., 1789). Подрост еловый, малочисленный, пятнисто размещённый по пробным площадям. Работы по прокладке сети открытых самотечных каналов поведены в период с 1972 по 1975 гг.

Интенсивность осушения достигается через базисное расстояние между осушительными каналами (130 м). Торфяная залежь, в основном, мезотрофного типа с относительной мощностью отложений в диапазоне от 0,5 до 1,5 м.

Лесной опытный объект 1 (ППП 8 (приканальная) и 9 (межканальная); местоположение N59°27.71', E40°15.11'; высота над уровнем моря

– 124 м; кв. 114 – рис. 4) представлен осушаемым сосняком бруснично-зеленомошного типа (*Pinetum vacciniosum-hylocomiosum drenantatum*). Среди живого напочвенного покрова преобладают: брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L., 1753; Cop1) и зелёные мхи, что представлены плевроциумом шребери (*Pleurozium schreberi* Willd. ex Brid., 1869; Cop2), дикранумом многожковым (*Dicranum polisetum* Sw., 1801; Cop1) и мниумом точечным (*Mnium punctatum* Hedw., T. J. Kop., 1898; Cop3). Подлесочные породы проявлены рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L., 1753; Sp) и крушиной ломкой (*Frangula alnus* Mill., 1768; Sol).

Опытный лесной объект 2 (ППП 2 (межканальная) и 3 (приканальная); местоположение N59°27.82', E40°15.31', высота над уровнем моря – 129 м; кв. 114 – рис. 4) представляет собой чернично-зеленомошный осушаемый сосновый древостой (*Pinetum myrtillosum-hylocomiosum drenantatum*) после проведения лесоводственного ухода. Кроме выше отмеченных видов растений на лесном объекте после антропогенного воздействия проявлены черника миртолистная (*Vaccinium myrtillus* L., 1753; Cop1), папоротник или телиптерис болотный (*Thelypteris palustris* Schott, 1834; Sp-Gr), сабельник болотный (*Comarum palustre* L., 1753; Sol), кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., 1772; Sp), хвощ болотный (*Equisetum palustre* L., 1753; Cop1-Gr) и щитовник гребенчатый (*Dryopteris cristata* (L.) A. Gray, 1848; Sp). В подлеске, кроме рябины (Cop1) и крушины (Sp), произрастают малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L., 1753; Sol) и грушанка круглолистная (*Pyrola rotundifolia* L., 1753; Sp).

На втором объекте в середине 80-х годов прошлого века силами Кадниковского лесхоза проведено лесоводственное мероприятие – проходная рубка ухода. Технологический процесс включал хлыстовую заготовку мелкосортной древесины с её трелёвкой по технологическим коридорам на погрузочный пункт (рис. 4). Уход проводила малая комплексная бригада при удалении деревьев бензопилами и трелёвкой хлыстов гусеничным трактором. Контроль качества выполнения работ и дальнейший мониторинг провели сотрудники Вологодской региональной лаборатории АИЛиЛХ (СевНИИЛХ) под

руководством Н.А. Дружинина (описанных в работах Н. А. Дружинина и Ф. Н. Дружинина (2024) [7], Н. А. Дружинина и др. (2023) [15]).

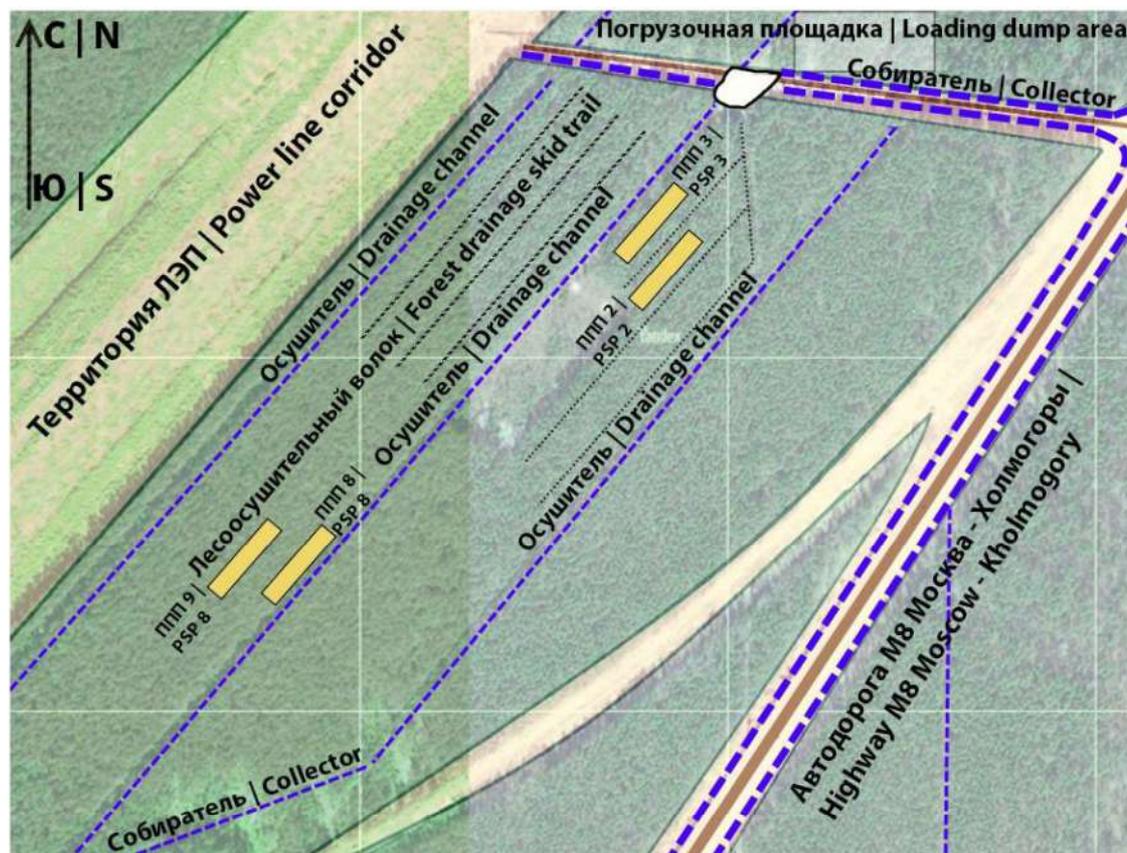


Рисунок 4. Схема расположения пробных площадей
Figure 4. Scheme of permanent sample plot arrangement

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Результаты исследования и их обсуждение

Под терпено-продуктивностью понималось количество выделившейся сосновой пасоки при одинаковых условиях эксперимента (однотипные способ подрумянивания ствола для эксперимента, параметры микро-ранений и трубок ПВХ, а также время выделения терпентина в одни сутки – от нанесения микро-ранения до факта замера потёка).

Исходя из полученной лесоводственно-таксационной характеристики нужно отметить преобладание среднего запаса сыро-растущей древесины на объекте после лесоводственного ухода (превышение на 35 м³ или 9%), кроме того, величина сухостойной древесины также ниже на в указанному древостое –

приблизительно в два раза. Ввиду того, что изучаемые древостои одного класса возраста, всё это указывает на явный положительный эффект от проведения ухода.

Принимая во внимание северо-восточное направление осушительных каналов, за пятилетний период времени изучения выделения терпентина при опытной подсочке установлена следующая ситуация (табл. 2).

Образование терпентина в сосняке на центральной части осушаемой полосы после лесоводственного ухода в июле превосходит результаты по июню на 25, а вблизи каналов – на 15%. Иная ситуация установлена в части соснового насаждения без ухода в центральной полосе между каналами – в два

первых летних месяца выделение терпентина оказалось приблизительно одинаковым. Средняя величина потёков за июнь и июль в сравнении с августом составила 26 %. Таким образом терпено-продуктивность (в среднем 48 см за сутки) осушаемого древостоя примерно на 5 % ниже, чем в осушаемом сосняке, изменённом лесоводственным уходом (среднее выделение 52,2 см), что также свидетельствует о положительном влиянии проходных рубок ухода на жизнестойкость сосновых деревьев. Прочерки в некоторых ячейках табл. 2 связаны с нехваткой фактических данных для проведения статистического анализа.

Усреднённые выходы терпентина в трубках ПВХ были соотнесены с разными классами крон, согласно румбовой классификации (рис. 2). По результатам исследования удалось выявить, что в июне на

объекте после лесоводственного ухода (ППП 2) деревья с наибольшим охвоением и раскидистостью на юго-западе имеют повышенную терпено-продуктивность, по сравнению с большей раскидистостью кроны на ЮВ (показатель надёжности $P = 0,5$, при $t_{фак.} (0,96) \geq t_{ст} (0,68)$). В приканальной части осушаемой лесополосы того же объекта (ППП 3) установлены повышенные выходы терпентина в июле у деревьев с более развитыми кронами на юго-востоке в сравнении с северо-западным доминированием ветвистости ($t_{фак.} (2,60) \geq t_{ст} (2,07)$ – доказано на уровне $P = 0,1$). В целом для рассматриваемого искусственно-дренируемого древостоя (уровень достоверности 0,5, при $t_{фак.} (1,35) \geq t_{ст} (0,68)$) получилось зафиксировать более высокие показатели терпено-продуктивности у сосен с кронами, более развитыми на юго-восточном румбе, относительно северо-восточного.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационные показатели опытных объектов

Table 1

Silvicultural and forest inventory indicators of experimental sites

Номер ППП, индекс типа леса, местоположение *, мероприятие ** PSP number, forest type index, location, silvicultural treatment	Состав древостоя Stand composition	Класс бонитета Grade of locality	Средний возраст, лет Average age, age	Древесная порода Wood species	Средняя высота, м Average height, m	Средний диаметр, см Average diameter, sm	Густота, экз./га Density, ind./ha	Полнота Completeness		Запас древесины, м³/га Stand of timber, m³/ha
								абсолютная, м²/га absolute, m²/ha	относительная relative	
2, С. чер.-з-м. ос., МК, ПРХ Р/У Bb-GM Pine Forest, drained, NCP, TO	10С, ед. Б 10P, single B	III	116	С Р	23,7	22,5	760	38,8	1,2	421
				С _{сух.} P _{dry}	-	-	208	-	-	16
				Б В	-	-	159	-	-	-
3, С. чер.-з-м. ос., ПК, ПРХ Р/У Bb-GM Pine Forest, drained, ICP, TO	10С+Е, ед. Б 10P+S, single B	III	120	С Р	23,7	23,8	645	34,2	0,9	354
				С _{сух.} P _{dry}	-	-	81	-	-	16
				Е S	-	-	136	-	-	-
				Б В			281			
8, С. бр.-з-м. ос., МК Co-GM Pine Forest, drained, NCP	10С, ед. Е 10P, single S	I V	118	С Р	21,0	19,7	166	40,3	1,1	377
				С _{сух.} P _{dry}	-	-	208	-	-	27
				Б В	-	-	194	-	-	-

Естественные науки и лес

9, С. бр.-з-м. ос., ПК Co-GM Pine Forest, drained, ICP	10С, ед. Б 10P, single B	III	106	С P	21,0	18,5	960	33,7	0,9	328
		-	-	С _{сух.} P _{dry}	-	-	274	-	-	42
		-	-	Б B	-	-	354	-	-	-

Примечание: положение деревьев на осушаемой полосе – приканальное (ПК) и в центре межканального пространства (МК), лесоводственное мероприятие – проходные рубки ухода (ПРХ Р/У)

Note: PSP – Permanent Sample Plot, tree position in the drained strip – near-channel (NCP) and center of the interchannel position (ICP); Silvicultural Treatment – Thinning Operations (TO)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

По полученным данным в осушаемом сосновом древостое без уходов, в приканальной части дренируемой полосы, в июне зафиксировано наибольшее выделение терпентина у деревьев, имеющих равномерную ветвистость в кронах, в соотношении с деревьями с наибольшим охвоением на юго-востоке (надёжность $P = 0,5$; $t_{фак.} (0,73) \geq t_{ст} (0,68)$). На идентичном уровне надёжности в июле удалось установить повышенную терпено-продук-

тивность (при той же дислокации деревьев) у равномерно-охвоённых сосен относительно эллиптических (неравномерно-раскидистых) крон – $t_{фак.} (0,73) \geq t_{ст} (0,71)$. Деревья, с кронами, более развитыми на северо-восточном направлении, на 50 %-ном уровне надёжности в июле и августе продемонстрировали увеличенное терпено-выделение относительно сосен с наибольшей охвоённостью на юго-западе ($t_{фак.} (1,02 \text{ и } 0,79) \geq t_{ст} (0,68)$ для VII и VIII месяцев, соответственно).

Таблица 2

Результаты вариационного анализа данных по выделению терпентина

Table 2

The results of the variance analysis of data on the extraction of turpentine

Номер ППП, месяц PSP number, month	Показатель Indicator	Шифры крон деревьев Tree crown codes					
		P	CB NE	C3 NW	Эн Ed	ЮВ SE	ЮЗ SW
2, июнь 2, June	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	-	0,502 ±0,001 3	0,428 ±0,004 6	0,261 ±0,008 9	0,717 ±0,007 2	0,837 ±0,010 0
	C	-	0,79	0,47	0,76	0,50	0,46
	N, %	-	13	26	7	33	20
2, июль 2, July	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	-	0,709 ±0,016 2	0,704 ±0,006 5	0,473 ±0,010 8	0,857 ±0,008 3	0,902 ±0,009 6
	C	-	0,72	0,41	0,51	0,49	0,41
	N, %	-	13	26	7	33	20
2, август 2, August	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	-	0,5079 ±0,012 6	0,329 ±0,004 7	0,310 ±0,008 0	0,495 ±0,005 9	0,502 ±0,007 9
	C	-	0,79	0,65	0,58	0,59	0,61
	N, %	-	13	26	7	33	20
3, июнь 3, June	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	46,0 ±0,012 5	0,377 ±0,005 9	0,494 ±0,008 4	-	0,537 ±0,005 9	0,465 ±0,005 8
	C	0,72	0,70	0,54	-	0,432	0,64
	N, %	9	25	12	-	19	33

Естественные науки и лес

3, июль 3, July	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,465 ±0,005 8	0,444 ±0,007 1	0,448 ±0,005 2	-	0,646 ±0,012 2	0,719 ±0,009 0
	C	0,64	0,72	0,36	-	0,73	0,63
3, август 3, August	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,257 ±0,006 2	0,338 ±0,006 1	0,386 ±0,006 1	-	0,511 ±0,008 4	0,507 ±0,006 3
	C	0,59	0,81	0,50	-	0,64	0,61
2 – 3, в среднем за три месяца 2 – 3 on average, over three months	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,394 ±0,008 2	0,480 ±0,001 0	0,465 ±0,005 9	0,348 ±0,009 2	0,627 ±0,008 0	0,655 ±0,008 0
	C	0,49	0,65	0,46	0,38	0,54	0,52
8, июнь 8, June	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,940 ±0,014 8	0,547 ±0,008 2	0,482 ±0,007 5	0,674 ±0,017 8	0,799 ±0,012 1	0,265 ±0,004 1
	C	0,35	0,76	0,49	0,59	0,68	0,49
	N, %	6	33	13	6	26	13
8, июль 8 July	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	1,08 ±0,010 2	0,707 ±0,009 6	0,544 ±0,008 0	0,903 ±0,022 2	0,856 ±0,012 4	0,279 ±0,006 3
	C	0,21	0,68	0,47	0,55	0,65	0,72
8, август 8, August	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,970 ±0,014 9	0,604 ±0,010 7	0,369 ±0,005 7	0,326 ±0,012 2	0,844 ±0,012 3	0,246 ±0,003 4
	C	0,34	0,89	0,49	0,83	0,64	0,44
9, июнь 9, June	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,460 ±0,009 9	0,521 ±0,008 8	0,286 ±0,005 7	-	0,225 ±0,007 3	0,473 ±0,009 6
	C	0,48	0,76	0,81	-	1,03	0,91
	N, %	7	28	22	-	14	28
9, июль 9, July	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,437 ±0,032 9	0,508 ±0,006 9	0,350 ±0,007 8	-	0,301 ±0,011 4	0,384 ±0,009 8
	C	1,68	0,62	0,89	-	1,20	1,14
9, август 9, August	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,172 ±0,008 8	0,478 ±0,008 4	0,294 ±0,007 4	-	0,140 ±0,004 9	0,381 ±0,008 7
	C	1,15	0,79	1,01	-	1,10	1,02
8 – 9, в среднем за три месяца 8 – 9 on average, over three months	Lcp., M±m _M (M) L avg, M±m _M (m)	0,677 ±0,015 2	0,561 ±0,008 8	0,388 ±0,007 0	0,634 ±0,001 7	0,528 ±0,010 1	0,338 ±0,007 0
	C	0,66	0,68	0,63	0,48	0,81	0,73

Примечание: жирным выделены максимумы по строкам

Note: The maxima across rows are highlighted in bold

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

На основе проведённого исследования для двух рассматриваемых категорий лесных объектов удалось установить, что после лесоводственного ухода сосны с равномерным распределением ветвей по сторонам света на 40 %, по сравнению с другими типами развитости крон, обладают ослабленной терпено-продуктивностью (это доказано на уровне значимости $0,5$ при $t_{\text{фак.}} (0,71) \geq t_{\text{ст}} (0,69)$). Определено, что сосновые деревья с преобладающей ветвистостью кроны на юго-востоке (на объекте после проходных рубок ухода) приблизительно на 16 % выделяют терпентина ($P = 0,5$; $t_{\text{фак.}} (0,87) \geq t_{\text{ст}} (0,68)$). Также при уровне надёжности 90 % (при $t_{\text{фак.}} (2,96) \geq t_{\text{ст}} (2,65)$) выявлено превышение терпено-выделения на 50 % с преобладанием охвоённости крон с юго-западной стороны для сосняков в аналогичных условиях местопрорастания.

Чаще всего повышенная изменчивость в выделении терпентина наблюдается у деревьев с более ветвистой кроной на северо-восточной стороне, что указывает на значительную индивидуальную изменчивость сосен по этому признаку. Максимальный коэффициент изменчивости зарегистрирован в осушаемом сосняке (ППП 9, МК), что подтверждает положительное воздействие лесоводственного ухода на способность деревьев выделять терпентин.

Анализ терпено-продуктивности деревьев в зависимости от раскидистости крон (рис. 5) показал следующие закономерности. В сосняке после проведения лесоводственного ухода максимальное положительное отличие по выделению терпентина у деревьев с узкими кронами отмечено в июне (23 %). В осушаемом древостое это отличие составило 29 % в июне и 26 % в июле. Следовательно, в эти месяцы у таких типов объектов условия роста лучше сказываются на выделении терпентина у сосен с узкой кроной, относительно деревьев с широкой кроной. Кроме того, установлено, что доля деревьев с широкими кронами (в процентном соотношении) выше в древостое после проходной рубки ухода (73 %), то-

гда как в осушаемом сосняке (ППП 8 и 9) их количество превышает на 50 %. Это объясняется сформировавшимися благоприятными условиями в том числе для развития крон у деревьев из-за удаления конкурирующих с ними деревьев в ходе проведенного ухода.

В течение летнего периода выявлена заметная разница в терпено-выделении между двумя категориями лесных объектов в зависимости от развитости их ассимиляционного аппарата. Дренаруемый сосняк после лесоводственных уходов уступает только осушаемому древостою: деревья с узкими кронами демонстрируют более интенсивное образование терпентина, превышая показатели на 10 и 28 % по сравнению с соответствующими категориями сосняков.

Подтвердились ранние высказывания исследователей (А. С. Новосёлова и В. П. Уханова (2020) [8], О.С. Попова (2024) [9], Штрахова С. Н. и др. (2024) [2], М. L. Gaylord и др. (2007) [6], А. Zaluma и др. (2022) [11]) о том, что немаловажную роль в терпено-продуктивности играют погодные условия (температура почвы и воздуха). Это хорошо отражается на колеблющейся связи выделения сосновой пасоки с таксационными диаметрами штамбов деревьев (табл. 3). Коэффициенты корреляции со значениями ниже 0,35 не учитывались, в связи с чем в ячейках табл. 3 указаны прочерки. Опытные насаждения относятся к шестому классу возраста и возможны замедления в их росте и формирование ядровой древесины. В большей степени отрицательные уровни корреляции отмечены в древостое без лесоводственного ухода. На третий год проведения эксперимента положительную связь удалось зафиксировать только в сосняке без лесоводственного ухода. Предположительно, превалирующая отрицательная связь вызвана ослабленным терпено-выделением в более старом возрасте деревьев, то есть при максимальных диаметрах штамбов. Преобладающая корреляция отмечена в приканальной области мелиорируемого сосняка.

Естественные науки и лес

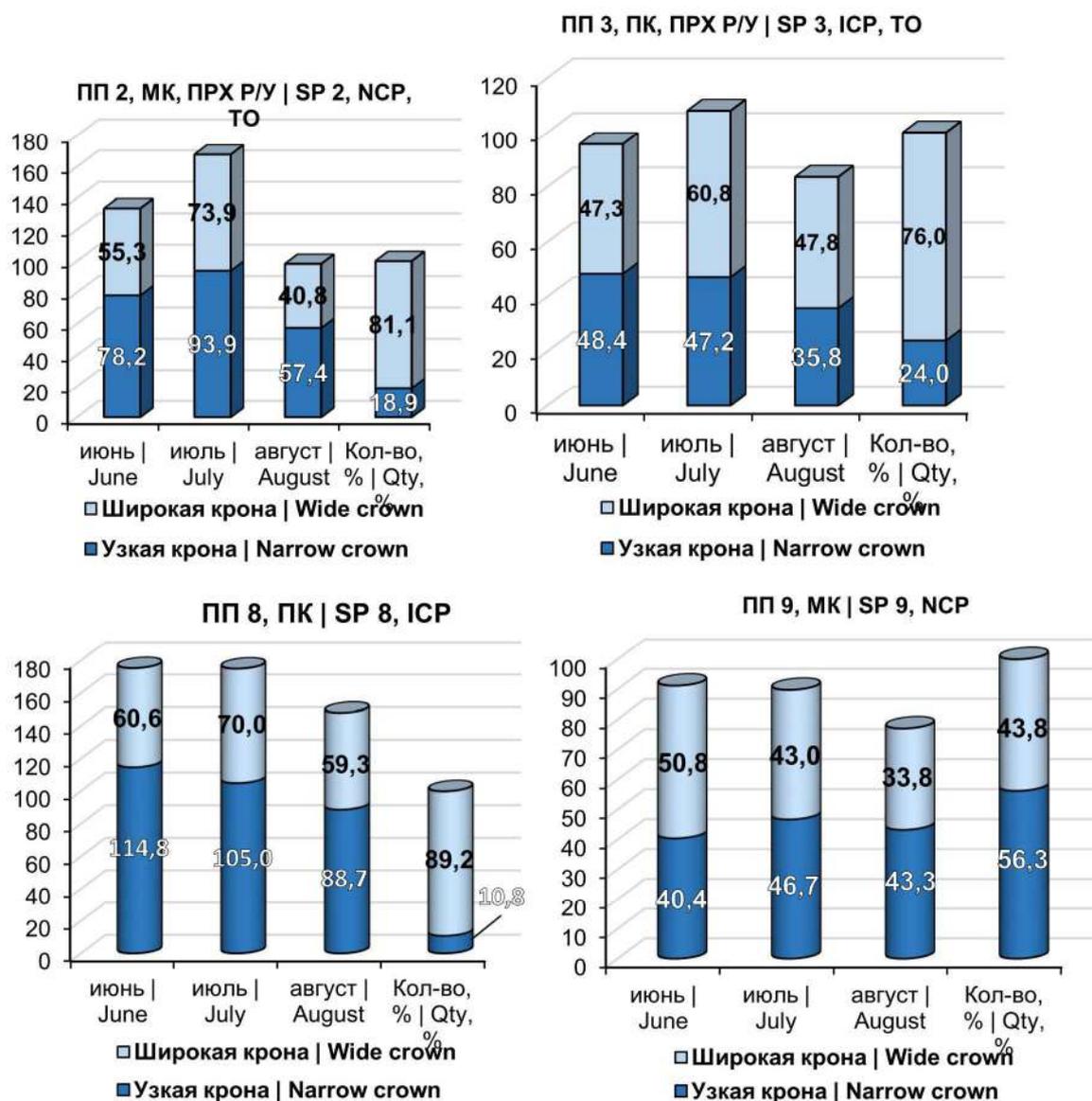


Рисунок 5. Среднее выделение терпентина за летний диапазон периода вегетации (см), согласно типам раскидистости крон деревьев

Figure 5. The average turpentine yield during the summer range of the vegetation period (cm), according to the types of tree crown spreading.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 3

Уровни связи (r ; t_r) между таксационным диаметром деревьев ($d_{1,3}$) и выделением терпентина в трубках ПВХ

Table 3

Correlation levels (r ; t_r) between the taxation diameter of trees ($d_{1,3}$) and turpentine yield in PVC tubes

Номер ППП, дислокация PSP number, dislocation	Месяцы летнего периода вегетации Months of the summer vegetation period	Годы проведения опытной подсочки Years of experimental resin tapping				
		1	2	3	4	5
2, МК 2, NCP	июнь June	-	-	-	-0,51, -3,63	-
	июль July	-	-	-	-	-
	август August	-	-0,40; -2,59	-	-	0,67; 6,57
3, ПК 3, ICP	июнь June	-	-	-	-	-
	июль July	-	-	-	-	-
	август August	-	-	-	-	0,39; 2,60
8, ПК 8, ICP	июнь June	-0,57; -4,67	-	-	-0,45; -3,07	-
	июль July	-0,49; -3,43	-0,43; -2,80	-	-	-
	август August	-0,45; -3,09	-0,49; -3,52	-	-0,61; -5,40	-
9, МК 9, NCP	июнь June	-	-	-	-	-
	июль July	-	-	0,35; 2,14	-	-
	август August	-	-	-	-	-

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Положительная корреляция зафиксирована лишь на пятый год проведения подсочки, причём для межканальной части древостоя после лесоводственного ухода удалось подобрать полиномиальное уравнение регрессии четвёртого порядка ($y = -0,028x^4 + 0,7948x^3 - 6,3686x^2 + 14,456x + 32,77$ при $R^2 = 0,713$).

Выводы

1) Проходная рубка ухода в сосновых насаждениях на болотно-торфяных почвах положительно сказалась в отношении изменения условий местопроизрастания, в частности, при проведенной оценке формирования ассимиляционного аппарата и выделения терпентина в сосновых насаждениях определено формирование более устойчивых древостоев из-за улучшенных условий роста (большее количество света, воды и питательных веществ для оставленного древостоя в виду удаления деревьев с дефектами) и устойчивости (наличие сухостойных деревьев снизилось в два раза, что свидетельствует о более благоприятных условиях роста;

2) За пятилетний период проведения опытной подсочки выявлено положительное влияние проходной рубки ухода на выделение терпентина (превышение на 5 % относительно осушаемых сосняков без влияния других лесоводственных мероприятий));

3) Выделение соснового терпентина на обоих лесных объектах в среднем за пять лет эксперимента превалировало в июле в виду активного роста деревьев в этот месяц из-за благоприятно сказывающейся на соснах теплой погоде и длинного светового дня (отклонение от средней величины за летний период в осушаемом древостое – на 22 %; а в осушаемом после проходной рубки ухода – на 10 %).

4) Связь терпено-продуктивности сосняков с таксационными диаметрами стволов деревьев установлена как неоднозначная (чаще она была зафиксирована обратной в древостое без проведения лесоводственного ухода, в частности, в приканальном положении во все месяцы летнего периода вегетации); положительный и высокий уровень связи

($r = 0,67$) выявлен лишь в августе пятого, заключительного, года подсочки в межканальной части осушаемой полосы на лесном объекте после лесоводственного ухода, что может быть объяснено наиболее благоприятными климатическими условиями в этот период для терпено-выделения сосен;

5) По результатам полевых исследований установлено, что румбовая классификация крон сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753) может использоваться для предварительной оценки способности деревьев к продуцированию терпентина при их отборе для промышленной подсочки. Практичность использования такой технологии заключается в возможном определении терпено-продуктивности по визуальной оценке крон деревьев без затраты длительного времени на подсочку;

6) Исследование степени развитости крон деревьев по сторонам света на объектах осушительной мелиорации позволило сделать вывод о том, что наиболее интенсивное выделение терпентина характерно сосновым деревьям с более развитыми кронами на ЮЗ, ЮВ и СЗ сторонах горизонта, что может быть связано с лучшим прогревом солнечными лучами и увеличением скорости ветра в трассах регулирующих водный режим каналов;

7) Эмпирически доказано, что наибольшими способностями по выделению сосновой пасоки обладают узко-кронные деревья (выделение терпентина (среднее терпено-выделение с узкими кронами – 66 см) в среднем на 24 % больше, чем у широко-кронных) несмотря на то, что в пологе преобладают широко-кронные сосны (средний потёк составил 53 см).

Список литературы

1. Красочко П.А., Мороз Д.Н., Понаськов М.А., Горелова О.Н., Фелив С.В., Черных О.Ю., Кривонос Р.А. Изучение антибактериальных и биоцидных свойств сосновой живицы // Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. – 2021. Т.10 (1). – С. 24-29. – DOI: <http://doi.org/10.48612/aefh-g2k9-3pb7>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46592513>.
2. Штрахов С.Н., Данилов Д.А., Зайцев Д.А. Оценка смолопродуктивности спелых чистых сосновых древостоев в Ленинградской области // Труды СПбНИИЛХ. – 2024. Вып. 3 (15). – С. 58 – 66. – DOI: <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.3.78>. Режим доступа: <https://journal.spb-niilh.ru/pdf/3-2024/spbniilh-proceedings-3-2024-7.pdf>
3. Aloui F., Baraket M., Jedidi S., Hmaidi B., Salem E.B., Jdaidi N., Taghouti I., Nasr Z., Abbes C. 4. Assessment of biological activities of resin extracted from Tunisian pine forests // Pakistan Journal of Botany – 2022. – 54 (2). – P. 97 – 102. DOI: [http://doi.org/10.30848/PJB2022-2\(45\)](http://doi.org/10.30848/PJB2022-2(45))
4. Ding X., Li Y., Zhang Y., Diao S., Luan Q., Jiang J. Genetic analysis and elite tree selection of the main resin components of slash pine // Frontiers in Plant Science – 2023. – 14. – P. 7. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079952>
5. Garcia-Fornier N., Campelo F., Carvalho A., Vieira J., Rodríguez-Pereiras A., Ribeiro M., Salgueiro A., Emilia Silva M., Luis Louzada J. Growth-defence tradeoffs in tapped pines on anatomical and resin production // Forest Ecology and Management – 2021. – 496. – P. 119 – 406. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119406>
6. Gaylord M.L., Kolb T.E., Wallin K.F., Wagner M.R. 7. Seasonal dynamics of tree growth, physiology, and resin defenses in a northern Arizona ponderosa pine forest // Canadian Journal of Forest Research – 2007. – 37 (7). – P. 1173-1183. – DOI: <http://doi.org/10.1139/X06-309>
7. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Лесопользование в осушаемых лесах: монография. – Вологда, Инфра-Инженерия, 2024. – 168 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fyzcmu>
8. Новоселов А.С., Уханов В.П. Водно-болотные угодья Сокольского района Вологодской области: монография. – Вологда, ВоГУ, 2020. – 167 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=DEFBGF>

9. Попов О. С. Лесоводственно-экологическая оценка влияния гидротехнической мелиорации на рост насаждений разного генезиса южно-таёжного района Европейского Севера: 4.1.6. «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата сельскохозяйственных наук / Попов Олег Сергеевич. – Архангельск, 2024. – 20 с. Режим доступа: https://narfu.ru/upload/iblock/175/8iar4pmd9dp4s1x8fb94byla7utpvcec/popov_autoref.pdf
10. Vázquez-González C., Zas R., Erbilgin N., Ferrenberg S., Rozas V., Sampedro L. Resin ducts as resistance traits in conifers: Linking dendrochronology and resinbased defences // *Tree Physiol* – 2020. – 40 (10). – P. 1313 – 1326. DOI: <http://doi.org/10.1093/treephys/tpaa064>
11. Zaluma A., Strike Z., Rieksts-Riekstiņš R., Gaitnieks T., Vasaitis R. Long-term pathological consequences of resin tapping wounds on stems of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) // *Trees*. – 2022. – 36 (5). – P. 1507 – 1514. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00468-022-02307-y>
12. Желдак В. И. Возможные решения проблем сохранения лесов и лесопользования в меняющихся природно-антропогенных условиях // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2020. – № 58. – С. 14 – 20. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44172887>
13. Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Статус гидромелиорации в нормативно-правовых актах лесного хозяйства в России // *Проблемы и состояние почв городских и лесных экосистем*. – 2021. – С. 62 – 65. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47177646>
14. Пономарева Т. И. Влияние лесосушения на лесорастительные условия сосняков кустарничково-сфагновых северотаёжного района Архангельской области: специальность 06.03.02. «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: диссертация на соискание учёной степени кандидата сельскохозяйственных наук / Пономарева Тамара Игоревна. – Архангельск, 2022. – 187 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48711212>
15. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н., Васильева О.А., Корякина Д.М., Цыпилев С.В. Особенности и лесоводственная эффективность проходных рубок в осушаемых лесах // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2023. – № 242. – С. 28 – 42. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50504394>
16. Gurau V., Ragland B., Cox D., Michaud A., Busby L. Robot Operations for Pine Tree Resin Collection // *Technologies* – 2021. – 9 (4). – 13 P. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9040079>
17. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Возобновление леса и возрастное строение древостоев на торфяных почвах. – Вологда, Полиграф-Периодика, 2021. – 118 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ebokop>
18. Шурыгин С.Г., Шурыгина М.С., Абукина Н.О. Стационарные исследования водного режима осушенных торфяных и минеральных лесных почв // *Проблемы и состояние почв городских и лесных экосистем*. – 2023. – С. 84 – 89. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tixjqc>
19. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н. Экология осушаемых лесов таежной зоны. – Вологда, Инфра-Инженерия. 2024. – 156 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=gkggsb>
20. Пахучая Л.М., Пахучий В.В. Видовое разнообразие лесных фитоценозов на участках с искусственным регулированием водного режима почв // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2023. – № 64. – С. 218 – 222. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44489950>
21. Тюкавина О. Н. Биолого-экологические закономерности продукционного процесса сосны обыкновенной в естественных и антропогенно трансформированных насаждениях: 06.03.02. «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора сельскохозяйственных наук / Тюкавина Ольга Николаевна. – Архангельск, 2021. – 43 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54430514>

References

1. Krasochko P.A., Moroz D.N., Ponas'kov M.A., Gorelova O.N., Feliv S.V., Chernykh O.Yu., Krivonos R.A. *Izuchenie antibakterial'nykh i biotsidnykh svoystv sosnovoi zhivitsy* [Study of antibacterial and biocidal properties of pine resin]. *Sbornik nauchnykh trudov Krasnodarskogo nauchnogo tsentra po zootekhonii i veterinarui = Collection of scientific papers of the Krasnodar Scientific Center of Animal Science and Veterinary Science*. 2021; 10 (1): 24-29 (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.48612/ae fh-g2k9-3pb7>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46592513>.
2. Shtrakhov S.N., Danilov D.A., Zaitsev D.A. *Otsenka smoloproduktivnosti spelykh chistykh sosnovykh drevostoev v Leningradskoi oblasti* [Evaluation of resin productivity of mature pure pine stands in the Leningrad region]. *Trudy SPbNILKh = Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*. 2024; 3 (15): 58 – 66. (In Russ.) DOI: <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2024.3.78>. URL: <https://journal.spb-niilh.ru/pdf/3-2024/spbniilh-proceedings-3-2024-7.pdf>
3. Aloui F., Baraket M., Jedidi S., Hmaid B., Salem E.B. Jdaidi N., Taghouti I., Nasr Z., Abbes C. *Assessment of biological activities of resin extracted from Tunisian pine forests*. *Pakistan Journal of Botany*. 2022; 54 (2). pp. 97 – 102. DOI: [http://doi.org/10.30848/PJB2022-2\(45\)](http://doi.org/10.30848/PJB2022-2(45))
4. Ding X., Li Y., Zhang Y., Diao S., Luan Q., Jiang J. *Genetic analysis and elite tree selection of the main resin components of slash pine*. *Frontiers in Plant Science* 2023; 14. pp. 7. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1079952>
5. Garcia-Fornier N., Campelo F., Carvalho A., Vieira J., Rodríguez-Pereiras A., Ribeiro M., Salgueiro A., Emilia Silva M., Luis Louzada J. *Growth-defence tradeoffs in tapped pines on anatomical and resin production*. *Forest Ecology and Management*. 2021; 496. pp. 119 – 406. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119406>
6. Gaylord M.L., Kolb T.E., Wallin K.F., Wagner M.R. *Seasonal dynamics of tree growth, physiology, and resin defenses in a northern Arizona ponderosa pine forest*. *Canadian Journal of Forest Research*. 2007; 37 (7). pp. 1173 – 1183. DOI: <http://doi.org/10.1139/X06-309>
7. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N. *Lesopol'zovanie v osushaemykh lesakh* [Forest management in drained forests]: monografiya. Vologda, Infra-Inzheneriya. 2024. 168 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=fyzcm y>
8. Novoselov A.S., Ukhanov V.P. *Vodno-bolotnye ugod'ya Sokol'skogo raiona Vologodskoi oblasti* [Wetlands of the Sokolsky District of the Vologda Region]: monografiya. Vologda, VoGU. 2020. 167 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=DEFBGF>
9. Popov O. S. *Lesovodstvenno-ekologicheskaya otsenka vliyaniya gidrotekhnicheskoi melioratsii na rost nasazhdenii raznogo genezisa yuzhno-taehznogo raiona Evropeiskogo Severa* [Silvicultural and ecological assessment of the impact of hydrotechnical melioration on the growth of plantations of different genesis in the southern taiga region of the European North]: 4.1.6. «Lesovedenie, lesovodstvo, lesnye kul'tury, agrolesomelioratsiya, ozelenenie, lesnaya pirologiya i taksatsiya»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata sel'skokhozyaistvennykh nauk / Popov Oleg Sergeevich. Arkhangel'sk, 2024. 20 p. (In Russ.). URL: https://narfu.ru/upload/iblock/175/8iar4pmd9dp4s1x8fb94byla7utpvcec/popov_autoref.pdf
10. Vázquez-González C., Zas R., Erbilgin N., Ferrenberg S., Rozas V., Sampedro L. *Resin ducts as resistance traits in conifers: Linking dendrochronology and resinbased defences*. *Tree Physiol*. 2020; 40 (10). P. 1313 – 1326. DOI: <http://doi.org/10.1093/treephys/tpaa064>
11. Zaluma A., Strike Z., Rieksts-Riekstiņš R., Gaitnieks T., Vasaitis R. *Long-term pathological consequences of resin tapping wounds on stems of scots pine (*Pinus sylvestris* L.)*. *Trees*. 2022; 36 (5). pp. 1507 – 1514. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00468-022-02307-y>
12. Zheldak V. I. *Vozможные resheniya problem sokhraneniya lesov i lesopol'zovaniya v menyayushchikhsya prirodno-antropogennykh usloviyakh* [Possible solutions to the problems of forest conservation and forest management in changing natural and anthropogenic conditions]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Current issues of the forestry complex*. 2020; 58: 14 – 20. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44172887>

13. Pakhuchii V.V., Pakhuchaya L.M. *Status gidromelioratsii v normativno-pravovykh aktakh lesnogo khozyaistva v Rossii* [The status of hydromelioration in forestry regulations in Russia] *Problemy i sostoyanie pochv gorodskikh i lesnykh ekosistem = Problems and condition of urban and forest ecosystems soils*. 2021; 62 – 65. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47177646>
14. Ponomareva T. I. *Vliyanie lesoosusheniya na lesorastitel'nye usloviya sosnyakov kustarnichkovo-sfagnovykh severotaezhnogo raiona Arkhangel'skoi oblasti* [The influence of forest drainage on forest growing conditions of pine forests of shrub-sphagnum in the northern taiga region of the Arkhangelsk region]: *spetsial'nost'* 06.03.02. «Lesovedenie, lesovodstvo, lesoustroistvo i lesnaya taksatsiya»: dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata sel'skokhozyaistvennykh nauk / Ponomareva Tamara Igorevna. Arkhangel'sk, 2022. 187 p (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48711212>
15. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N., Vasil'eva O.A., Koryakina D.M., Tsypilev S.V. *Osobennosti i lesovodstvennaya effektivnost' prokhodnykh rubok v osushaemykh lesakh* [Features and silvicultural efficiency of thinning in drained forests]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii = News of the Saint Petersburg Forestry Academy*. 2023; 242: 28 – 42. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50504394>
16. Gurau V., Ragland B., Cox D., Michaud A., Busby L. *Robot Operations for Pine Tree Resin Collection*. *Technologies*. 2021; 9 (4). 13 P. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9040079>
17. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N. *Vozrobnovlenie lesa i vozrastnoe stroenie drevostoev na torfya-nykh pochvakh*. [Forest regeneration and age structure of tree stands on peat soils]. Vologda, Poligraf-Periodika, 2021. 118 s (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ebokop>
18. Shurygin S.G., Shurygina M.S., Abukina N.O. *Statsionarnye issledovaniya vodnogo rezhima osushennykh torfyanykh i mineral'nykh lesnykh pochv* [Stationary studies of the water regime of drained peat and mineral forest soils]. *Problemy i sostoyanie pochv gorodskikh i lesnykh ekosistem = Problems and condition of urban and forest ecosystems soils*. 2023; 84 – 89 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tixjqc>
19. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N. *Ekologiya osushaemykh lesov taezhnoi zony*. [Ecology of drained forests of the taiga zone]. Vologda, Infra-Inzheneriya. 2024. 156 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=gkggsb>
20. Pakhuchaya L.M., Pakhuchii V.V. *Vidovoe raznoobrazie lesnykh fitotsenozov na uchastkakh s iskus-stvennym regulirovaniem vodnogo rezhima pochv* [Species diversity of forest phytocenoses in areas with artificial regulation of soil water regime]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of the forest complex*. 2023; 64: 218 – 222 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44489950>
21. Tyukavina O. N. *Biologo-ekologicheskie zakonomernosti produktsionnogo protsessa sosny obyknovЕННОЙ v estestvennykh i antropogenno transformirovannykh nasazhdeniyakh* [Biological and ecological patterns of the production process of Scots pine in natural and anthropogenically transformed stands]: 06.03.02. «Lesovedenie, lesovodstvo, lesoustroistvo i lesnaya taksatsiya»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora sel'skokhozyaistvennykh nauk / Tyukavina Ol'ga Nikolaevna. Arkhangel'sk, 2021. 43 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54430514>

Сведения об авторах

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

Попов Олег Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ассистент кафедры лесного хозяйства ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина», ул. Шмидта, 2, с. Молочное, гор. округ г. Вологда, Российская Федерация, 160555, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Естественные науки и лес

Information about the authors

✉ *Anatoly S. Novoselov* – Cand. Agr. Sci., Associate Professor of the Department of Geography and Rational Nature Management, Vologda State University, 15 Lenin Street, Vologda, Russian Federation, 160000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

Oleg S. Popov – Cand. Agr. Sci., Assistant of the Department of Forestry, Vologda State Dairy Farming Academy by N.V. Vereshchagin, 2 Schmidt St., Molochnoye, Vologda Urban Okrug, 160555, Russian Federation, 160555, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-1729>, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

✉ - Для контактов/Corresponding

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/7>

УДК 630*6



Стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России

Андрей А. Парамонов¹ ✉ a.paramonov@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Сергей В. Третьяков^{1,2}, s.v.tretyakov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Сергей В. Коптев^{1,2}, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Алексей А. Карабан¹, karaban@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

Александр П. Богданов^{1,2}, a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Илья В. Цветков^{1,2}, i.tsvetkov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, 163062, Российская Федерация

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Аннотация

В данной работе представлены нормативы, которые рекомендуется использовать при определении полноты и запаса ивовых древостоев по бонитетам в таёжной зоне Европейского Севера России. Было выявлено, что ранее данные лесотаксационные нормативы для ивы не разрабатывались, вместо них использовались нормативы осины, что приводило к определённым ошибкам из-за различия формы древесных стволов этих пород. В нашей стране ива (*Salix* L.) распространена практически везде, всего в мире насчитывается по разным источникам от 300 до 550 видов, из них более 130 видов в России, а также более 30 в таёжной зоне Европейского Севера. Сбор полевого материала проводился с 2018 по 2024 гг. в Северо-таёжном и Двинско-Вычегодском районах Архангельской области. При сборе и обработке полевых материалов использовали принятые в лесной таксации методы. Нормативы разрабатывались на основе 53-х пробных площадей с взятием модельных деревьев возрастом 15-70 лет и таксационным диаметром 4-16 см. Среди модельных деревьев чаще всего встречались такие виды как ива козья (*Salix carpea* L.) и ива северная (*Salix borealis* Fries.), реже ива трёхтычинковая (*Salix triandra* L.), довольно часто попадались гибриды этих видов. По результатам исследований впервые были разработаны: 1) Стандартная таблица сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России; 2) Стандартная таблица сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев по классам бонитета в таёжной зоне Европейского Севера России.

Ключевые слова: Ива, *Salix*, запас древостоя, нормальные древостои, сумма площадей сечений, нормативы, таёжная зона, Европейский Север

Финансирование: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы – 123022800113-9).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России / А. А. Парамонов, С. В. Третьяков, С. В. Коптев, А. А. Карабан, А. П. Богданов, И. В. Цветков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 107-121. – Библиогр.: с. 115-119 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/7>.

Поступила 05.02.2025. Пересмотрена 26.04.2025. Принята 26.05.2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.

Article

Standard tables of sums of cross-sectional areas and stocks of normal willow stands in the taiga zone of the European North of Russia

Andrey A. Paramonov¹✉, a.paramonov@sevniilh-arh.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Sergey V. Tretyakov^{1,2}, s.v.tretyakov@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Sergey V. Koptev^{1,2}, s.koptev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Alexey A. Karaban¹, karaban@sevniilh-arh.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

Alexander P. Bogdanov^{1,2}, a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>

Ilya V. Tsvetkov^{1,2}, i.tsvetkov@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>

¹ Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation

² Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation

Abstract

This paper presents the standards recommended for use in determining the relative density and growing stock of willow stands by bonitets in the taiga zone of the European North of Russia. It was found that these forest taxation standards for willow had not been developed previously and standards for aspen were used instead, which led to certain errors due to the difference in the shape of the tree trunks of these species. In our country, willow (*Salix* L.) is widespread almost everywhere; according to various sources, there are from 300 to 550 species in the world, of which more than 130 species are in Russia, as well as more than 30 in the taiga zone of the European North. Field material was collected from 2018 to 2024 in the North Taiga and Dvinsko-Vychegodsky districts of the Arkhangelsk region. The methods adopted in forest taxation were used for collecting and processing field materials. The standards were developed on the basis of 53 test plots and using model trees aged 15-70 years and with a breast height diameter of 4-16 cm. Among the model trees, the most common species were goat willow (*Salix carpea* L.) and northern willow (*Salix borealis* Fries.), less often the three-stamen willow (*Salix triandra* L.), and hybrids of these species were quite common. Based on the research results, the following were developed for the first time: 1) A standard table of the sums of the cross-sectional areas and timber reserves per 1 ha of normal willow stands in the taiga zone of the European North of Russia; 2) A standard table of the sums of the cross-sectional areas and timber reserves per 1 ha of normal willow stands by bonity classes in the taiga zone of the European North of Russia.

Keywords: *Salix*, Willow, growing stock, normal stands, sum of cross-sectional areas, standards, taiga zone, European North

Funding: The publication was prepared based on the results of research carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution "SevNIILH" to conduct applied scientific research in the field of activities of the Federal Forestry Agency (registration number of the topic - 123022800113-9).

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to reviewing the article.

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest.

For citation: Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Bogdanov A.P., Tsvetkov I.V. (2025). Standard tables of sums of areas of sections and reserves of normal willow trees in the taiga zone of the European North of Russia. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 107-121 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/7>.

Received 05.02.2025. *Revised* 26.04.2025. *Accepted* 26.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Мероприятия по охране, защите и воспроизводству лесов невозможны без поддержания актуальности лесотаксационных нормативов. Для эффективного планирования и управления лесным хозяйством в насаждениях с преобладанием ивы на территории таёжной зоны Европейского Севера требуется наличие надёжных нормативов, содержащих в себе информацию об их строении, росте и продуктивности. В нашей стране ива произрастает практически во всех регионах, включая арктические пустыни. На территории Российской Федерации ива насчитывает более 130 видов, среди которых на территории таёжной зоны Европейского Севера более 30 [1, 2, 3]. В нашей стране бывшие сельскохозяйственные земли интенсивно зарастают быстрорастущими породами, такими как ива, ольха и др. [4].

Стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов древостоев широко применяются в производстве при таксации насаждений и проведении лесоустроительных работ. Такие нормативные таблицы древостоев ивы для территории таёжной зоны Европейского Севера РФ никем не разрабатывались. На сегодняшний день, ощущается повышение интереса и возрастание потребности в получении таких нормативов для района исследования. Такая потребность объясняется существенным увеличением площади произрастания ивы, ввиду зарастания ивой запущенных сельхозугодий. Помимо этого таёжная зона Европейского Севера богата участками с избыточным увлажнением, непригодными для сельского хозяйства, на которых довольно хорошо растёт множество видов ивы. Актуальность такой проблемы определила цель для выполнения данной работы, а именно формирование нормативных таблиц сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне северо-востока европейской части России. С помощью таких таблиц, появится возможность определять полноту и запас ивовых древостоев.

На сегодняшний день ива древовидная является наиболее перспективной древесной породой для изучения, так как она довольно быстрорастущая, непривередливая к почвам. Ива является основной породой для плантационного выращивания, так как обладает высокой способностью к быстрому приросту, формированию значительной надземной биомассы и оперативному восстановлению после рубок.

Древесина, кора, ветки и листья ивы – довольно ценное сырьё в хозяйственном значении, так как их применяют: в медицине; в производстве мебели, плетёных изделий и дубильных экстрактов высокого качества; в качестве биотоплива; в ЦБП; для кормления скота и диких животных; в пчеловодстве; для чистки поверхностных сточных вод и почв; для водоохраных и берегозащитных функций и т.д. Кроме того, быстрорастущие виды ивы находят свое применение в создании защитных полос от ветра, рекультивации и ремедиации земель, а также для озеленения, как городов, так и промышленных зон. [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

За рубежом активно набирает популярность короткоротационные (энергетические) лесные плантации из ивы, так как получаемое биотопливо, является возобновляемым источником энергии [14]. При умеренном климате в год можно произвести около 20 тонн на га сухого вещества из древесины *Salix* [15, 16].

Анализ нормативно-справочных материалов показал, что в разработанных ранее справочниках «Полевой справочник таксатора (1971)» [17] и «Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации (2012)» [18], имеется лишь одна таблица для учета выхода ивового корья: «4.3.14 Таблица для определения запаса ивового корья. Применение – во всех лесотаксационных подрайонах». Кору ивы широко использовали для получения дубильных веществ во времена СССР, когда процветала кожевенная промышленность [17, 18].

Подобные нормативы для ивы древовидной отсутствуют и в других справочниках: «Лесотаксационный справочник по Северо-западу СССР (1984)» [19] и «Общесоюзные нормативы для таксации лесов» (1992) [20].

На основе изучения данных государственного лесного реестра Архангельской области было выявлено, что ивовые насаждения занимают площадь 5,3 тысячи гектар, с наибольшей представленностью в Красноборском и Мезенском районах Архангельской области. Кустарниковая ива занимает значительно меньшую площадь [21, 22].

На основе вышеупомянутых проблем, была сформулирована цель настоящего исследования, которая заключается в: повышении качества таксационных, лесоустроительных и мониторинговых работ путём создания стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев для таёжной зоны Европейского Севера России.

Материалы и методы

Исходные материалы для данной работы собирались с 2018 по 2024 гг. Полевые исследования проводились в нескольких лесничествах Архангельской области, которые входили в Северо-таёжный и Двинско-Вычегодский лесные районы. Выбор участков, для закладки пробных площадей основывался на составе древостоя: чтобы на пробной площади, запас ивы древовидной достигал не менее 50%, преимущественно выбирались чистые ивовые насаждения.

Для разработки нормативных таблиц сумм площадей сечений и запасов ивовых насаждений использовались данные 53-х пробных площадей со срубкой и обмером модельных деревьев. Закладка пробных площадей проводилась в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные». Во время закладки пробных площадей, и взятия модельных деревьев придерживались общепринятых методических рекомендаций [20, 23, 24]. Возраст модельных деревьев, использованных для разработки нормативных таблиц, составил 15-70 лет, при таксационных диаметрах 4-16 сантиметров.

На каждой пробной площади было взято по одному модельному дереву. У модельных деревьев были замерены диаметры в коре и без коры на отно-

сительных высотах. Производились отметки о наличии гнилей и других пороков древесины, а также отмечалось количество сучков, у которых замерялся диаметр основания и протяженность по ГОСТ 2140–81. «Видимые пороки древесины». Обработка модельных деревьев происходила посредством общепринятых лесотаксационных методов [24, 25, 26].

Продольное сечение древесных стволов ивы характеризуется сложной формой. По диаметрам в коре на десятых долях высоты дерева для каждой модели рассчитывали объём ствола посредством сложной формулы среднего сечения (10 секций). Для получения данных о форме ствола вычисляли старое видовое число как отношение объёма ствола к объёму цилиндра с общим диаметром на высоте 1,3 м. Далее, на каждой секции (0,1 высоты) был вычислен прирост диаметра по пятилетиям. Полученные результаты исследований, послужили основой для разработки таблиц хода роста ивы древовидной [27]. Значения высот при соответствующих диаметрах были отобраны из материалов пробных площадей.

Используя разработанные таблицы хода роста Парамонов и др. (2021) [27] и методики Н.В. Третьякова (1937) [28], В.В. Загреева (1968) [29], А.В. Вагина (1976) [30], В.Л. Черных и др. (2009) [31], П.М. Верхунова и В.Л. Черных (2009) [32], Н.П. Анучина (2004) [33] были составлены стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России.

Результаты

С использованием определителя ив И.Р. Морозова (1966) [34], было выявлено, что видовой состав исследуемых видов ивы был следующий: ива козья (*Salix carpea* L.), ива северная (*Salix borealis* Fries.), и ива трёхтычинковая (*Salix triandra* L.), следует отметить, что по большей части наблюдалась гибридизация данных видов [34]. Мета-анализ факторов, влияющих на объёмные показатели стволов ивы древовидной, показывает близкие значения [35].

Первые стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов были разработаны ЦНИИЛХом под руководством Н.В. Третьякова в 1937 году [28]. Эти таблицы строились посредством связи

сумм площадей сечений и запаса нормальных древостоев с их средней высотой.

На основе методик Н.В. Третьякова (1937) [28], В.В. Загреева (1968) [29], А.В. Вагина (1976) [30], В.Л. Черных (2009) [31], П.М. Верхунова и В.Л. Черных (2009) [32], Н.П. Анучина (2004) [33] и ранее опубликованных нами таблиц хода роста ивы древовидной (2021) [27], были разработаны стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев.

Было получено уравнение зависимости сумм площадей сечений древостоя на 1 га от средней высоты древостоя (1):

$$y = 13,351 \cdot \ln(x) - 7,0485, \quad (1)$$

где: y – сумма площадей сечений м²/га;

x – средняя высота, м.

Коэффициент детерминации (R^2) равен 0,8512, стандартная ошибка регрессии (SE) равна

3,630, следовательно, данное уравнение имеет достаточно высокую точность.

Запас определяли как произведение суммы площадей сечений на высоту и старое видовое число (2).

$$M = \Sigma G \cdot H \cdot f, \quad (2)$$

где: M – запас стволовой древесины в коре, м³/га;

ΣG – сумма площадей сечений, м², га;

H – средняя высота, м;

f – старое видовое число.

Полученные формулы использовали для построения стандартной таблицы сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России (Таблица 1).

Таблица 1

Стандартная таблица сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев в таёжной зоне Европейского Севера России

Table 1

Standard table of cross-sectional areas sums and wood stocks per 1 ha of normal willow stands in the taiga zone of the European North of Russia

Средняя высота, м Average height, m	Сумма площадей сечений, м ² /га Sum of cross-sectional areas, m ² /ha	Запас стволовой древесины в коре, м ³ /га Stock of stem wood in bark, m ³ /ha
3	7,6	20,4
4	11,5	34,7
5	14,4	48,9
6	16,9	63,1
7	18,9	77,5
8	20,7	92,2
9	22,3	107,1
10	23,7	122,2
11	25,0	137,6
12	26,1	153,3
13	27,2	169,2
14	28,2	185,4
15	29,1	201,7
16	30,0	218,3
17	30,8	235,1
18	31,5	252,1
19	32,3	269,3
20	32,9	286,7
21	33,6	304,3
22	34,2	322,1
23	34,8	340,0
24	35,4	358,1
25	35,9	376,4
26	36,5	394,8
27	37,0	413,3

Естественные науки и лес

28	37,4	432,0
29	37,9	450,9
30	38,4	469,8

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Такая таблица проста по конструкции и может использоваться без учета условий произрастания насаждений ивы древовидной.

Аналогичным методом, но уже с учетом места произрастания, была разработана стандартная таблица сумм площадей сечений и запасов нормальных ивовых древостоев на 1 га по классам бонитета

в таёжной зоне Европейского Севера России (Таблица 3).

Уравнения для вычисления суммы площадей сечения на 1 га при различной высоте дерева по классам бонитета приведены в таблице 2.

Коэффициент детерминации (R^2) и стандартная ошибка регрессии (SE), указывают на то, что введенные уравнения адекватны и корректны.

Таблица 2

Уравнения для вычисления суммы площадей сечения на 1 га при различной высоте дерева по классам бонитета

Table 2

Equations for calculating the sum of cross-sectional areas per 1 ha for different tree heights according to quality classes

Бонитет Creditworthiness	Уравнение Equation	Стандартная ошибка регрессии SE The standard error of regression SE	Коэффициент детерминации (R^2) Coefficient of determination (R^2)
I	$y = 13,533 \ln(x) + 4,3316$	3,734	0,9278
II	$y = 13,37 \ln(x) + 0,1187$	3,048	0,9399
III	$y = 13,06 \ln(x) - 1,5658$	3,518	0,9383
IV	$y = 8,5123 \ln(x) + 4,219$	4,636	0,7849
V	$y = 6,932 \ln(x) + 1,303$	2,429	0,8465

Примечания: y – сумма площадей сечений $m^2/га$; x – средняя высота, м; | Notes: y – is the sum of cross-sectional areas m^2/ha ; x – is the average height, m;

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Таблица 3

Стандартная таблица сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев по классам бонитета в таёжной зоне Европейского Севера России

Table 3

Standard table of cross-sectional areas sums and wood stocks per 1 ha of normal willow stands by bonity classes in the taiga zone of the European North of Russia

Средняя высота, м Average height, m	I Бонитет I bonity class		II Бонитет II bonity class		III Бонитет III bonity class		IV Бонитет IV bonity class		V Бонитет V bonity class	
	Сумма площадей сечений, $m^2/га$ Sum of cross-sectional areas, m^2/ha	Запас ствольной древесины в коре, $m^3/га$ Stock of stem wood in bark, m^3/ha	Сумма площадей сечений, $m^2/га$ Sum of cross-sectional areas, m^2/ha	Запас ствольной древесины в коре, $m^3/га$ Stock of stem wood in bark, m^3/ha	Сумма площадей сечений, $m^2/га$ Sum of cross-sectional areas, m^2/ha	Запас ствольной древесины в коре, $m^3/га$ Stock of stem wood in bark, m^3/ha	Сумма площадей сечений, $m^2/га$ Sum of cross-sectional areas, m^2/ha	Запас ствольной древесины в коре, $m^3/га$ Stock of stem wood in bark, m^3/ha	Сумма площадей сечений, $m^2/га$ Sum of cross-sectional areas, m^2/ha	Запас ствольной древесины в коре, $m^3/га$ Stock of stem wood in bark, m^3/ha
2	13,7	31,8	9,4	21,8	7,5	17,4	10,1	23,5	6,1	14,2
3	19,2	51,4	14,8	39,6	12,8	34,2	13,6	36,3	8,9	23,9

Естественные науки и лес

4	23,1	70,0	18,7	56,5	16,5	50,1	16,0	48,6	10,9	33,1
5	26,1	88,4	21,6	73,3	19,5	65,9	17,9	60,7	12,5	42,2
6	28,6	106,9	24,1	90,0	21,8	81,7	19,5	72,8	13,7	51,3
7	30,7	125,6	26,1	107,0	23,8	97,6	20,8	85,1	14,8	60,6
8	32,5	144,5	27,9	124,2	25,6	113,9	21,9	97,5	15,7	69,9
9	34,1	163,6	29,5	141,7	27,1	130,3	22,9	110,1	16,5	79,4
10	35,5	183,1	30,9	159,4	28,5	147,0	23,8	122,9	17,3	89,1
11	36,8	202,8	32,2	177,4	29,8	164,0	24,6	135,8	17,9	98,8
12	38,0	222,7	33,3	195,6	30,9	181,2	25,4	148,9	18,5	108,7
13	39,0	242,9	34,4	214,1	31,9	198,7	26,1	162,1	19,1	118,7
14	40,0	263,3	35,4	232,8	32,9	216,4	26,7	175,5	19,6	128,9
15	41,0	284,0	36,3	251,8	33,8	234,3	27,3	189,0	20,1	139,1
16	41,9	304,9	37,2	270,9	34,6	252,4	27,8	202,7	20,5	149,5
17	42,7	326,0	38,0	290,3	35,4	270,7	28,3	216,5	20,9	160,0
18	43,4	347,3	38,8	309,9	36,2	289,2	28,8	230,4	21,3	170,6
19	44,2	368,8	39,5	329,7	36,9	308,0	29,3	244,5	21,7	181,3
20	44,9	390,5	40,2	349,6	37,6	326,9	29,7	258,7	22,1	192,1
21	45,5	412,4	40,8	369,8	38,2	346,0	30,1	272,9	22,4	203,0
22	46,2	434,5	41,4	390,1	38,8	365,2	30,5	287,4	22,7	213,9
23	46,8	456,7	42,0	410,6	39,4	384,6	30,9	301,9	23,0	225,0
24	47,3	479,1	42,6	431,3	39,9	404,2	31,3	316,5	23,3	236,2
25	47,9	501,7	43,2	452,1	40,5	424,0	31,6	331,2	23,6	247,4
26	48,4	524,4	43,7	473,1	41,0	443,9	32,0	346,1	23,9	258,7
27	48,9	547,3	44,2	494,2	41,5	463,9	32,3	361,0	24,1	270,1
28	49,4	570,3	44,7	515,5	42,0	484,1	32,6	376,0	24,4	281,6
29	49,9	593,5	45,1	536,9	42,4	504,4	32,9	391,1	24,6	293,1
30	50,4	616,8	45,6	558,4	42,9	524,9	33,2	406,3	24,9	304,7

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Значения, приведенные в таблице 3 в отличие от таблицы 1, построены по классам бонитета, что позволяет повысить как универсальность, так и точность определения относительной полноты и запаса древостоев в соответствии с условиями места произрастания.

Представленные в этой работе таблицы сумм площадей сечений и запасов древостоев ивы древесной довольно просто использовать при определении полноты и запаса таксируемого ивового древостоя. Для этого нужно определить среднюю высоту, а также посредством перечета или закладки круговой реласкопической площадки установить сумму площадей сечений фактического древостоя, которую делят на сумму площадей сечений нормального древостоя, взятую из разработанных в этой работе таблиц 1 или 3. В результате будет получена относительная полнота таксируемого древостоя. Далее полученная полнота умножается на запас нормального насаждения, при полноте 1,0 также

взятый из таблицы 1 или 3, в результате будет вычислен запас таксируемого насаждения.

Обсуждение

Полученные в ходе выполнения работы стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев для таёжной зоны Европейского Севера России ранее отсутствовали, вследствие чего приходилось использовать материалы других лиственных пород. Для сопоставления полученных данных с материалами других лиственных пород в районе исследований получена зависимость запаса стволовой древесины в нормальных древостоях коре ивы, березы и осины от средней высоты на Европейском Севере России (рисунок 1). Для разработки графика, были использованы видовые высоты осины и березы из «Лесотаксационного справочника по северо-востоку европейской части Российской Федерации (2012)» [18], которые подходят для применения в таёжной зоне Европейского Севера России.

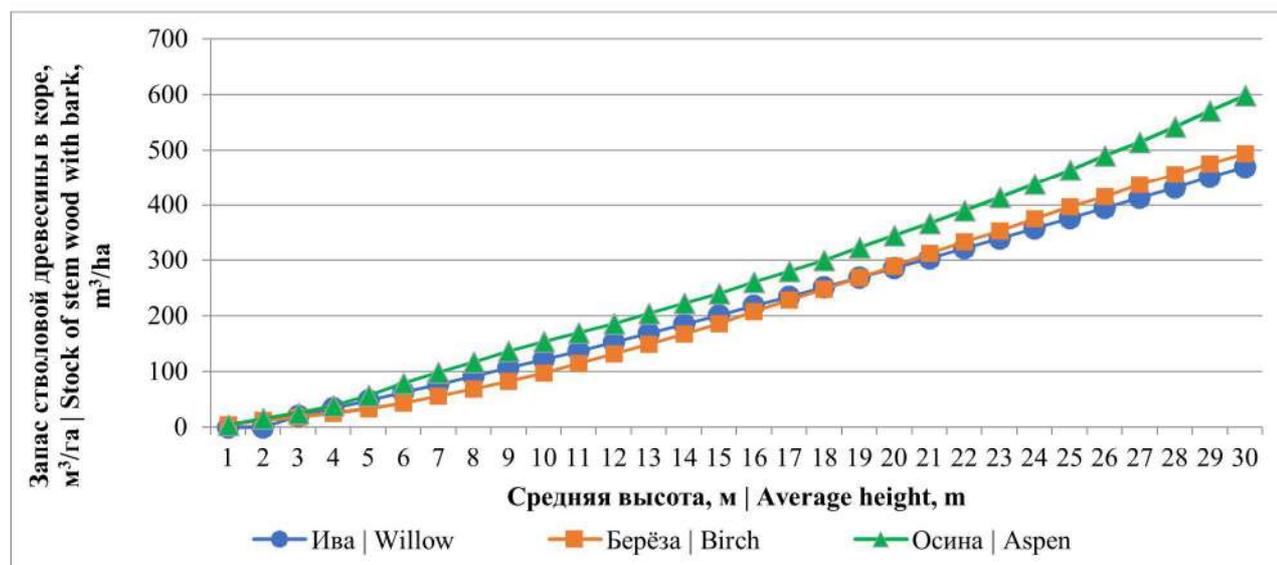


Рисунок 1. Зависимость запаса стволовой древесины в нормальных древостоях в коре ивы, берёзы и осины от средней высоты на европейском Севере России

Figure 1. Dependence of the stock of stem wood in normal stands in the bark of willow, birch and aspen on the average height in the European North of Russia

Источник: материалы ивы – собственные вычисления авторов; материалы берёзы и осины взяты из: Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Федер. Агентство лесного хоз-ва, Федер. Бюджет. Учреждение «Сев.науч.-исслед. Ин-т лесного хоз-ва» / сост.: канд. с.-х. наук Г. С. Войнов и др. – Архангельск: ОАО ИПП «Правда Севера», 2012. – 672 с. [18].

Source: willow materials are the authors' own calculations; birch and aspen materials are taken from: *Lesotaksacionnyj spravocnik po severo-vostoku evropejskoj chasti Rossijskoj Federacii: (normativny'e materialy` dlya Nenezckogo avtonomnogo gokruga, Arxangel'skoj, Vologodskoj oblasti i Respubliki Komi)*. [Forest tax reference book for the north-east of the European part of the Russian Federation: (normative materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk, Vologda regions and the Komi Republic)] / Feder. Agentstvo lesnogo hoz-va, Feder. Byudzhzet. Uchrezhdenie «Sev.nauch.-issled. In-t lesnogo hoz-va» = Feder. Forestry Agency, Feder. Budget. The institution "Northern Research Institute of Forestry" / com.: Candidate of Agricultural Sciences G. S. Vojnov et al. – Arxangell'sk: OAO IPP «Pravda Severa», 2012. – 672 p. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19518627> [18].

На рисунке 1 видно, что в зависимости от средней высоты древостоя запасы осины и берёзы отличаются от запаса стволовой древесины ивы древовидной. Так как нормативы таксации для ивы древовидной отсутствовали, при лесоустройстве использовали нормативы для осины и берёзы, что отразилось на точности лесотаксационных работ.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что разработанные стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев по классам бонитета в таёжной зоне Европейского Севера России, достаточно своевременны и актуальны.

Заключение

Древостой ивы древовидной нередко развиваются на территории защитных лесов, в основном на берегозащитных участках. Там они могут сохранять и укреплять стабильное состояние ландшафтов вокруг водоёмов. Данное свойство этих насаждений имеет высокую значимость. Так как нормативные таблицы для ивовых насаждений для таёжной зоны Европейского Севера Российской Федерации ранее не были разработаны, на производстве использовались таблицы от осины и берёзы, что сказывалось на точности работ ввиду того, что по своей форме, стволы этих пород имеют существенные различия.

По результатам проведенных исследований впервые разработаны стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов древесины на 1 га нормальных ивовых древостоев по классам бонитета в таёжной зоне Европейского Севера России. С их помощью повысится точность определения относительной полноты и запаса древостоев ивы в соответ-

ствии с условиями места произрастания в районе исследования при таксации насаждений в ходе выполнения лесоустроительных и мониторинговых работ.

Разработанные нормативы таксации основаны на большом фактическом материале, полученном при взятии модельных деревьев и закладке различных пробных площадей. Это гарантирует достоверность результатов исследований.

Список литературы

1. Демидова Н.А., Дуркина Т.М. Результаты испытания местных и интродуцированных видов рода *Salix* Европейском Севере России // Научные ведомости БелГУ. – Серия: Естественные науки. – 2012. – №21. – 140 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20212181>.
2. Скворцов А.К. Ивы СССР: Систематический и географический обзор. – М.: Наука, 1968. – 262 с. – URL: <https://djvu.online/file/fJFzMnxvHoTc7>.
3. Теплякова Т.Е. Основные факторы экологического пространства флоры Северо-Запада Восточной Европы // Биосфера. – 2012. – № 1. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17657199>.
4. Жижин С.М., Магасумова А.Г., Оплетаев А.С. Зарастание древесной растительностью сельскохозяйственных угодий в южной подзоне тайги Республики Удмуртия // Вестник Бурят. с.-х. акад. – 2021. – № 2 (63). – С. 84–91. – DOI: 10.34655/bgsha.2021.63.2.012. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46244249>.
5. Harada E., Hokura A., Nakai I., Terada Y., Baba K., Yazaki K., Shiono M., Mizuno N., Mizuno T. Assessment of willow (*Salix* sp.) as a woody heavy metal accumulator: Field survey and in vivo X-ray analyses. *Metallomics*. 2011; 3: 1340-1346. – DOI: 10.1039/C1MT00102G.
6. Hangs R. D., Schoenau J. J., Van Rees K. C. J., Steppuhn H. Examining the salt tolerance of willow (*Salix* spp.) bioenergy species for use on saltaffected agricultural lands. *Can. J. Plant Sci.* 2011; 91: 509-517. – DOI: 10.4141/cjps10135.
7. Keller C., Hammer D., Kayser A., Richner W., Brodbeck M., Sennhauser M. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant Soil*. 2003; 249: 67-81. – DOI: 10.1023/A:1022590609042.
8. Kuznetsova T, Rosenvald K, Ostonen I et al. Survival of black alder (*Alnus glutinosa* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in a reclaimed oil shale mining area. *Ecol Eng*. 2010; 36: 495-502. – DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.11.019.
9. Mitch W. J., Gosselink J. G. Wetlands. 3rd edn. John Wiley & Sons, New York. 2000; 1: 920. – DOI: 10.1002/rrr.637.
10. Rowe R. L., Hanley M. E., Goulson D., Clarke D. J., Doncaster C. P., Taylor G. Potential benefits of commercial willow Short Rotation Coppice (SRC) for farm-scale plant and invertebrate communities in the agri-environment. *Biomass Bioenergy*. 2011; 35. 1: 325-336. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.046.
11. Rytter L. Grey alder in forestry. A review. *Norw J Agric Sci. Suppl.* 1996; 24: 65-84. – URL: https://www.researchgate.net/publication/285307993_Grey_alder_in_forestry_A_review.
12. Sandak A., Sandak J., Waliszewska B., Zborowska M., Mleczek M. Selection of optimal conversion path for willow biomass assisted by near infrared spectroscopy. *iForest*. 2017; 10: 506-514. – DOI: 10.3832/ifor1987-010
13. Епанчинцева О.В., Тишкина Е.А., Монтиле А.А. Опыт выращивания ив в различных почвенно-гидрологических условиях // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 6(92). – С. 118-123. – DOI: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-118-123. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47395385_78731515.pdf.
14. Hytönen J., Saarsalmi A. Biomass production of coppiced grey alder and the effect of fertilization. *Silva Fenn.* 2015; 49 (1). Article id1260. – DOI: 10.14214/sf.1260.

15. Heinsoo K., Sild E., Koppel A. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations. *For. Ecol. Manage.* 2002; 170: 67-74. – DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00784-8.
16. Stolarski M., Szczukowski S., Tworowski J., Klasa A. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass Bioenergy.* 2008; 32: 1227-1234. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.02.023.
17. Полевой справочник таксатора (Для таежных лесов Европейского Севера) / сост. И. И. Гусев, В. И. Калинин, О. А. Неволин [и др.]. – Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1971. – 196 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007330319>.
18. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Федер. Агентство лесного хоз-ва, Федер. Бюджет. Учреждение «Сев.науч.-исслед. Ин-т лесного хоз-ва» / сост.: канд. с.-х. наук Г. С. Войнов и др. – Архангельск: ОАО ИПП «Правда Севера», 2012. – 672 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19518627>.
19. Лесотаксационный справочник по Северо-Западу СССР / сост. А. Г. Мошкалев., Г. М. Давидов, Л. Н. Яновский, В. С. Моисеев, Д. П. Столяров, Ю. Н. Бурневский. – Л.: ЛТА, 1984. – 320 с. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/lesotaks/text.pdf>.
20. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / сост. В. В. Загреев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко, Н. Н. Гусев, А. Г. Мошкалев. – Москва Колос, 1992. – 495 с. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/taksac/text.pdf>.
21. Лесной план Архангельской области Российской Федерации на 2019 – 2028 годы. [Утв. указом Губернатора Архангельской области от 14 декабря 2018 г. № 116-у]. – Архангельск. – 2018. – 239 с. – URL: https://portal.dvinaland.ru/upload/iblock/ecf/LesPlan_Ukaz_116-y_ot_%2014_12_2018.pdf.
22. Карабан А.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Цветков И.В., Давыдов А.В. Аналитический обзор ресурсов фитомассы древесных пород, перспективных для плантационного выращивания // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России : материалы научно-практической конференции, Архангельск, 23–24 ноября 2023 года. – Москва: Т8 Издательские Технологии, 2023. – С. 132-139. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_59995009_91283395.pdf.
23. Верхунов П.М., Черных В.Л. Таксация леса: учебное пособие. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – 398 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/39599>.
24. Гусев И.И., Калинин В.И. Лесная таксация: учебное пособие к проведению полевой практики. – Л.: ЛТА, 1988. – 61 с. – URL: <https://e-catalog.nlb.by/Record/BY-NLB-rr34262680000>.
25. Анучин Н.П. Лесная таксация: учебник для вузов. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 552 с. – URL: [https://dl.libcats.org/genesis/201000/f8f0ef9a8522adfb50ea5c20238e4555/_as/\[N.P.Anuchin.\]_Lesnaya_taksaciya\(libcats.org\).pdf](https://dl.libcats.org/genesis/201000/f8f0ef9a8522adfb50ea5c20238e4555/_as/[N.P.Anuchin.]_Lesnaya_taksaciya(libcats.org).pdf).
26. Гусев И.И. Моделирование экосистем: учебное пособие. – Архангельск: изд-во АГТУ, 2002. – 112 с. – URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_334585/.
27. Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В. Таблицы хода роста нормальных ивовых древостоев таёжной зоны северо-востока европейской части России // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2021. – № 2. – С. 17-27. – DOI: 10.21178/2079-6080.2021.2.17. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46326236>.
28. Третьяков Н.В. Методика учета среднего и текущего прироста древостоев // Вопросы лесной таксации: Сб. тр. ЦНИИЛХ. – Л., 1937. – С. 3-18. – URL: <https://catalog.belstu.by/catalog/books/doc/210909>.
29. Загреев В.В. Методика составления уточненной стандартной таблицы сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0 // Исследования по лесной таксации и лесоустройству: сб. работ ВНИИЛМ. – М.: Лесн. пром-ть, 1968. – С. 57-74.
30. Вагин А.В. Критерии полноты сосновых насаждений СССР. – М.: ЦБНТИ, 1976. – 28 с. – URL: <https://catalog.belstu.by/catalog/books/doc/97503>.

31. Черных В.Л., Попова А.В., Киселева Н.Г. Таблицы сумм площадей сечений, видовых высот и запасов для древостоев сосны искусственного происхождения северо-восточной части Республики Марий Эл // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: лес. Экология. Природопользование. – МарГТУ, 2009. – №1. – С. 3-18. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11933672>.
32. Верхунов П.М., Черных В. Л. Таксация леса: учебное пособие. – 2-е изд., стереотип. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – 396 с.
33. Анучин Н.П. Лесная таксация: учебник. – М.: ВНИИЛМ, 2004. – 552 с.
34. Морозов И.Р. Определитель ив СССР и их культура. – М.: Лесн. пром-сть, 1966. – 254 с. – URL: <http://nskhuman.ru/shipunov/biblbook.php?nbook=6765>.
35. Усольцев В.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Цепордей И.С. Модель объема ствола ивы: мета-анализ // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2021. – № 3. – С. 49–58. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-49-58. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45830005>.

References

1. Demidova N. A., Durkina T. M. *Rezul'taty` ispy`taniya mestny`x i introducirovanny`x vidov roda Salix Evropejskom Severe Rossii*. [Test results of local and introduced species of the genus *Salix* in the European North of Russia] // *Nauchny`e vedomosti BelGU = Scientific Bulletin of BelSU. Seriya: Estestvenny`e nauki*. 2012; 21: 140. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20212181>.
2. Skvortzov A. K. *Ivy` SSSR: Sistematicheskij i geograficheskij obzor* [Willows of the USSR: A systematic and geographical overview]. M.: Nauka, 1968: 262. (In Russ.). URL: <https://djvu.online/file/fJFzMnxvHoTc7>.
3. Teplyakova T. E. *Osnovny`e faktory` e`kologicheskogo prostranstva flory` Severo-Zapada Vostochnoj Evropy`*. [The main factors of the ecological space of the flora of the North-West of Eastern Europe] // *Biosfera = Biosphere*. 2012; 1. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17657199>.
4. Zhizhin S. M., Magasumova A. G., Opletaev A. S. *Zarastanie drevesnoj rastitel`nost`yu sel`skoxozyajstvenny`x ugodij v yuzhnoj podzone tajgi Respubliki Udmurtiya*. [Overgrowth of woody vegetation of agricultural lands in the southern taiga subzone of the Republic of Udmurtia] // *Vestnik Buryat. s.-x. akad. = Bulletin of the Buryat Agricultural Academy*. 2021; 2(63): 84–91. DOI: 10.34655/bgsha.2021.63.2.012. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46244249>.
5. Harada E., Hokura A., Nakai I., Terada Y., Baba K., Yazaki K., Shiono M., Mizuno N., Mizuno T. Assessment of willow (*Salix* sp.) as a woody heavy metal accumulator: Field survey and in vivo X-ray analyses. *Metallomics*. 2011; 3: 1340-1346. DOI: 10.1039/C1MT00102G.
6. Hangs R. D., Schoenau J. J., Van Rees K. C. J., Steppuhn H. Examining the salt tolerance of willow (*Salix* spp.) bioenergy species for use on salt affected agricultural lands. *Can. J. Plant Sci*. 2011; 91: 509-517. DOI: 10.4141/cjps10135.
7. Keller C., Hammer D., Kayser A., Richner W., Brodbeck M., Sennhauser M. Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant Soil*. 2003; 249: 67-81. DOI: 10.1023/A:1022590609042.
8. Kuznetsova T, Rosenvald K, Ostonen I et al. Survival of black alder (*Alnus glutinosa* L.), silver birch (*Betula pendula* Roth.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in a reclaimed oil shale mining area. *Ecol Eng*. 2010; 36: 495-502. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.11.019.
9. Mitch W. J., Gosselink J. G. *Wetlands*. 3rd edn. John Wiley & Sons, New York. 2000; 1: 920. DOI: 10.1002/trr.637.
10. Rowe R. L., Hanley M. E., Goulson D., Clarke D. J., Doncaster C. P., Taylor G. Potential benefits of commercial willow Short Rotation Coppice (SRC) for farm-scale plant and invertebrate communities in the agri-environment. *Biomass Bioenergy*. 2011; 35. 1: 325-336. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.046.
11. Rytter L. Grey alder in forestry. A review. *Norw J Agric Sci. Suppl*. 1996; 24: 65-84. URL: https://www.researchgate.net/publication/285307993_Grey_alder_in_forestry_A_review.

12. Sandak A., Sandak J., Waliszewska B., Zborowska M., Mleczek M. Selection of optimal conversion path for willow biomass assisted by near infrared spectroscopy. *iForest*. 2017; 10: 506-514. DOI: 10.3832/ifor1987-010.
13. Epanchinceva O. V., Tishkina E. A., Montile A. A. *Opyt vyrashchivaniya iv v razlichnyh pochvenno-gidrologicheskikh usloviyah*. [The experience of willow cultivation in various soil and hydrological conditions] // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestiya Orenburg State Agrarian University*. 2021; 6(92): 118-123. (In Russ.). DOI: 10.37670/2073-0853-2021-92-6-118-123. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47395385_78731515.pdf.
14. Hytönen J., Saarsalmi A. Biomass production of coppiced grey alder and the effect of fertilization. *Silva Fenn*. 2015; 49 (1). Article id1260. DOI: 10.14214/sf.1260.
15. Heinsoo K., Sild E., Koppel A. Estimation of shoot biomass productivity in Estonian *Salix* plantations. *For. Ecol. Manage.* 2002; 170: 67-74. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00784-8.
16. Stolarski M., Szczukowski S., Tworowski J., Klasa A. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass Bioenergy*. 2008; 32: 1227-1234. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.02.023.
17. *Polevoj spravochnik taksatora (Dlya taezhny'x lesov Evropejskogo Severa)*. [Taxator's Field Guide (For taiga forests of the European North)] / com.: I. I. Gusev, V. I. Kalinin, O. A. Nevolin [et al.]. Arxangel'sk: Sev.-Zap. kn. izd-vo, 1971: 196. (In Russ.). URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007330319>.
18. *Lesotaksacionny'j spravochnik po severo-vostoku evropejskoj chasti Rossijskoj Federacii: (normativny'e materialy` dlya Neneczkogo avtonomnogo gokruga, Arxangel'skoj, Vologodskoj oblastej i Respubliki Komi)*. [Forest tax reference book for the north-east of the European part of the Russian Federation: (normative materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk, Vologda regions and the Komi Republic)] / Feder. Agentstvo lesnogo xoz-va, Feder. Byudzhzet. Uchrezhdenie «Sev.nauch.-issled. In-t lesnogo xoz-va» = Feder. Forestry Agency, Feder. Budget. The institution " Northern Research Institute of Forestry " / com.: Candidate of Agricultural Sciences G. S. Vojnov et al. Arxangel'sk: OAO IPP «Pravda Severa», 2012: 672. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19518627>.
19. *Lesotaksacionny'j spravochnik po Severo-Zapadu SSSR*. [Forest tax reference book for the North-West of the USSR] / com.: A. G. Moshkalev., G. M. Davidov, L. N. Yanovskij, V. S. Moiseev, D. P. Stolyarov, Yu. N. Burnevskij. L.: LTA, 1984: 320. (In Russ.). URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/lesotaks/text.pdf>.
20. *Obshhesoyuzny'e normativy` dlya taksacii lesov*. [Union-wide standards for forest taxation] / com.: V. V. Zagreev, V. I. Suxix, A. Z. Shvidenko, N. N. Gusev, A. G. Moshkalev. Moskva Kolos, 1992: 495. (In Russ.). URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/taksac/text.pdf>.
21. *Lesnoj plan Arxangel'skoj oblasti Rossijskoj Federacii na 2019 – 2028 gody`*. [Forest plan of the Arkhangelsk region of the Russian Federation for 2019-2028] / Utv. ukazom Gubernatora Arxangel'skoj oblasti ot 14 dekabrya 2018 g. № 116–u = Approved by Decree of the Governor of the Arkhangelsk Region dated December 14, 2018. No 116-U. Arxangel'sk. 2018: 239. (In Russ.). URL: https://portal.dvinaland.ru/upload/iblock/ecf/LesPlan_Ukaz_116-y_ot_%2014_12_2018.pdf.
22. Karaban A. A., Paramonov A. A., Tref'yakov S. V., Koptev S. V., Cvetkov I. V., Davydov A. V. *Analiticheskij obzor resursov fitomassy drevesnyh porod, perspektivnyh dlya plantacionnogo vyrashchivaniya*. [Analytical review of phytomass resources of tree species promising for plantation cultivation] // *Aktual'nye voprosy taezhnogo i pritundrovogo lesovodstva na Evropejskom Severe Rossii : materialy nauchno-prakticheskoy konferencii, Arxangel'sk, 23–24 noyabrya 2023 goda = opical issues of taiga and tundra forestry in the European North of Russia : proceedings of the scientific and practical conference, Arkhangelsk, November 23-24, 2023*. Moskva: Izdatel'skie Tekhnologii, 2023; 8: 132-139. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_59995009_91283395.pdf.
23. Verxunov P. M., Cherny'x V. L. *Taksaciya lesa: uchebnoe posobie*. [Forest taxation: a study guide]. – Joshkar-Ola: MarGTU, 2007: 398. (In Russ.). URL: <https://e.lanbook.com/book/39599>.

24. Gusev I. I., Kalinin V. I. *Lesnaya taksaciya: uchebnoe posobie k provedeniyu polevoj praktiki*. [Forest taxation: a training manual for field practice]. L.: LTA, 1988: 61. (In Russ.). URL: <https://e-catalog.nlb.by/Record/BY-NLB-rr34262680000>.
25. Anuchin N. P. *Lesnaya taksaciya: uchebnyk dlya vuzov*. [Forest taxation: a textbook for universities]. M.: Lesnaya promyshlennost' = Forest Industry, 1982: 552. (In Russ.). URL: [https://dl.libcats.org/genesis/201000/f8f0ef9a8522adfb50ea5c20238e4555/_as/\[N.P.Anuchin.\]_Lesnaya_taksaciya\(libcats.org\).pdf](https://dl.libcats.org/genesis/201000/f8f0ef9a8522adfb50ea5c20238e4555/_as/[N.P.Anuchin.]_Lesnaya_taksaciya(libcats.org).pdf).
26. Gusev I. I. *Modelirovanie e'kosistem: uchebnoe posobie*. [Ecosystem modeling: a textbook]. – Arxangel'sk: izd-vo AGTU, 2002: 112 p. (In Russ.). URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_334585/.
27. Paramonov A. A., Tret'yakov S. V., Koptev S. V. *Tablicy xoda rosta normal'ny'x ivovy'x drevostoev tayozhnoj zony' severo-vostoka evropejskoj chasti Rossii*. [Tables of the growth course of normal willow stands in the taiga zone of the north-east of the European part of Russia] // Trudy' Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo xozyajstva = Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry. SPb.: SPbNIIIX, 2021; 2: 17-27. (In Russ.). DOI: 10.21178/2079-6080.2021.2.17. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46326236>.
28. Tret'yakov N. V. *Metodika ucheta srednego i tekushhego prirosta drevostoev*. [The methodology of accounting for the average and current growth of stands] // Voprosy' lesnoj taksacii: Sb. tr. CzNIIIX = Issues of forest taxation: Proceedings of the Central Research Institute of Agriculture. L., 1937: 3-18. (In Russ.). URL: <https://catalog.belstu.by/catalog/books/doc/210909>.
29. Zagreev V. V. *Metodika sostavleniya utochnennoj standartnoj tablicy summ ploshhadej sechenij i zapasov pri polnote 1,0*. [Methodology for compiling an updated standard table of sums of cross-section areas and reserves with a completeness of 1.0] // Issledovaniya po lesnoj taksacii i lesoustrojstvu: sb. rabot VNIILM = Research on forest taxation and forest management: collection of works by VNIILM. M.: Lesn. prom-t', 1968: 57-74. (In Russ.).
30. Vagin A. V. *Kriterii polnoty' sosnovy'x nasazhdenij SSSR*. [Criteria for completeness of USSR pine plantations]. M.: CzBNTI, 1976: 28. (In Russ.). URL: <https://catalog.belstu.by/catalog/books/doc/97503>.
31. Cherny'x V. L., Popova A. V., Kiseleva N. G. *Tablicy summ ploshhadej sechenij, vidovy'x vy'sot i zapasov dlya drevostoev sosny' iskusstvennogo proisxozhdeniya severo-vostochnoj chasti Respubliki Marij E'l*. [Tables of sums of cross-sectional areas, specific heights and stocks for stands of artificial pine in the northeastern part of the Republic of Mari El] // Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Seriya: les. E'kologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of the Mari State Technical University. Series: forest. Ecology. Environmental management. MarGTU, 2009; 1: 3-18. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11933672>.
32. Verxunov P. M., Cherny'x V. L. *Taksaciya lesa: uchebnoe posobie* [Forest taxation: a textbook]. 2-e izd., stereotip = 2nd ed., stereotype. Joshkar-Ola: MarGTU, 2009: 396. (In Russ.).
33. Anuchin N. P. *Lesnaya taksaciya: uchebnyk*. [Forest taxation: a textbook]. M.: VNIILM, 2004: 552. (In Russ.).
34. Morozov I. R. *Opredelitel' iv SSSR i ix kul'tura*. [The determinant of the willow trees of the USSR and their culture]. M.: Lesn. prom-st', 1966: 254. (In Russ.). URL: <http://nskhuman.ru/shipunov/biblbook.php?nbook=6765>.
35. Usol'cev V. A., Paramonov A. A., Tret'yakov S. V., Koptev S. V., Cepordej I. S. *Model' ob'`ema stvola ivy': meta-analiz*. [Willow trunk volume model: meta-analysis] // Izv. vuzov. Lesnoj zhurnal = Izvestiya vuzov. Forest Magazine. 2021; 3: 49–58. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45830005>.

Сведения об авторах

✉ *Парамонов Андрей Алексеевич* – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>, e-mail: a.paramonov@sevniih-arh.ru.

Третьяков Сергей Васильевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002,

Естественные науки и лес

главный научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Коптев Сергей Викторович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, главный научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

Карaban Алексей Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>, e-mail: karaban@sevniilh-arh.ru.

Богданов Александр Петрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, старший научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>, e-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru.

Цветков Илья Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>, e-mail: i.tsvetkov@narfu.ru.

Information about the authors

✉ *Andrey A. Paramonov* – Candidate of Agricultural Sciences, Researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>, e-mail: a.paramonov@sevniilh-arh.ru.

Sergey V. Tretyakov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Forestry and Forestry, Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation, Chief researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Sergey V. Koptev – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation, Chief researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

Alexey A. Karaban – Candidate of Agricultural Sciences, Junior Research Scientist of the Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>, e-mail: karaban@sevniilh-arh.ru.

Alexander P. Bogdanov – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation, Senior researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1655-7212>, e-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru.

Естественные науки и лес

Ilya V. Tsvetkov – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry and Forestry, Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation, Researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-32540>, e-mail: i.tsvetkov@narfu.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding



Влияние климатических факторов на развитие заболеваний дуба черешчатого (*Quercus robur L.*) на примере мучнистой росы

Олег В. Серебряков¹✉, o-ser00@mail.ru <https://orcid.org/0009-0006-1171-0368>

Елена В. Турчанинова¹, misstur@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0003-1800-240X>

Николай Н. Харченко¹, forest.vrn@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>

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

Аннотация

Мучнистая роса, вызванная *Erysiphe alphitoides*, является одним из наиболее опасных грибковых заболеваний дуба черешчатого (*Quercus robur L.*), поражающим растения в широком географическом ареале. Заболевание вызывает значительное снижение физиологических функций деревьев, включая угнетение фотосинтеза (до 3,5 раз) и увеличение устьичной проводимости (на 60%), что особенно критично для старовозрастных дубов и насаждений в условиях городской среды.

Целью исследования являлось выявление взаимосвязи климатических факторов (температуры, влажности, уровня осадков) и распространения мучнистой росы на дубе черешчатом в условиях Воронежской Нагорной Дубравы. Объектами исследования стали 80 старовозрастных дубов на участках с различными микроклиматическими условиями. Для анализа спороношения использовался метод улавливания спор с использованием предметных стекол с агаровыми полосками, установленными в кронах деревьев. Климатические данные фиксировались в период наблюдений.

Результаты показали усиление спороношения при повышении температуры воздуха свыше 22°C и влажности 70–80%. Максимальная концентрация конидий (92 споры/см²) зафиксирована в благоприятных метеоусловиях. Установлена значительная роль микроклиматических условий в развитии заболевания, что необходимо учитывать при разработке методов защиты насаждений. Предложенная методология сбора данных позволяет создать научные предпосылки для активного мониторинга масштабов спороношения и раннего прогнозирования вспышек мучнистой росы на основе текущих климатических данных. В долгосрочной перспективе результаты исследования будут полезны для обеспечения устойчивого управления дубовыми лесами, предотвращения деградации.

Ключевые слова: мучнистая роса (*Erysiphe alphitoides*), дуб черешчатый (*Quercus robur L.*), климатические изменения, патоген.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Серебряков, О. В. Влияние климатических факторов на развитие заболеваний дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на примере мучнистой росы / О. В. Серебряков, Е. В. Турчанинова, Н. Н. Харченко // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 122-141. – Библиогр.: с. 138-140 (16 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/8>.

Поступила 17.02.2025. Пересмотрена 22.04.2025. Принята 26.05.2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.

Article

Influence of climatic factors on the development of diseases of oak petiole (*Quercus robur* L) on the example of powdery mildew

Oleg V. Serebryakov¹ ✉, o-ser00@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0006-1171-0368>

Elena V. Turchaninova¹, misstur@yandex.ru  <https://orcid.org/0009-0003-1800-240X>

Nikolay N. Kharchenko¹, forest.vrn@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>

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

Abstract

Powdery mildew is a fungal disease caused by the pathogen *Erysiphe alphitoides* and affects sweet oak (*Quercus robur*), a tree species found across a wide geographical region. The disease significantly impairs the physiological functions of affected trees, leading to a reduction in photosynthesis by up to 3.5 times and an increase in stomatal conductivity by 60%. This is particularly critical for mature oaks in urban areas.

Our study aimed to investigate the relationship between climatic conditions, such as temperature, humidity, and precipitation, and the spread of powdery mildew in the Voronezh region's Upland Oak Groves. We focused on 80 mature oak trees in areas with varying microclimates, using the method of spore collection on agar strips placed in the tree crowns. Climate data were recorded during the observational period.

The findings revealed an increase in powdery mildew sporulation with rising temperatures above 22 °C and humidity between 70-80%. The highest concentration of conidia, reaching 92 spores/cm², was observed under favorable weather conditions. Our study underscores the crucial role of microclimate in the development of the disease, emphasizing the need for tailored strategies in forest management. By employing the proposed data collection approach, we can lay the groundwork for proactive monitoring of sporulation patterns and early prediction of powdery mildew outbreaks, leveraging current climate information. In the long run, these findings contribute to sustainable oak forest management, mitigating the risk of forest degradation.

Keywords: *powdery mildew (Erysiphe alphitoides), petiolate oak (Quercus robur L.), climate change, pathogen*

Funding: This study received no external funding

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: Serebryakov O.V., Turchaninova E.V., Kharchenko N.N. (2025). The influence of climatic factors on the development of diseases of black oak (*Quercus robur* L.) on the example of powdery mildew / Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 122-141 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/8>.

Received 17. 02.2025. *Revised* 22.04.2025. *Accepted* 26.05. 2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Одной из распространённых патологий листовых растений выступает мучнистая роса. При поражении растения данной болезнью нарушаются основные процессы метаболизма, что приводит к замедлению роста, снижению зимостойкости и ухудшению устойчивости к неблагоприятным условиям окружающей среды. Высокая агрессивность грибов, вызывающих мучнистую росу, делает изучение их биоэкологических особенностей актуальной задачей, особенно учитывая разнообразие лесорастительных зон. В условиях города Воронежа необходимость подобных исследований определяется тем, что листовые растения, подверженные данной патологии в различной степени, занимают основное место в объектах ландшафтной архитектуры. Мучнистая роса является одним из самых распространённых грибковых заболеваний дуба черешчатого. Обычно считается, что причиной появления характерного белого налета на листьях является сумчатый гриб из рода *Microspore*. Однако зарубежные исследования также связывают это заболевание с грибом *Erysiphe alphitoides* [1]

Грибы, вызывающие мучнистую росу, являются облигатными биотрофами, которые поглощают питательные вещества из живых клеток растения-хозяина, не убивая их, с помощью специализированных структур, называемых гаусториями [2]. Таким образом, они забирают у растения фотосинтезируемые вещества для собственного питания [3].

Исследования физиологических последствий заражения листьев дуба мучнистой росой показали, что болезнь отрицательно влияет на скорость ассимиляции CO₂, хотя влияние было умеренным, и фотосинтез сохранялся даже при почти полном покрытии поверхности листа мицелием [4]. Мучнистая роса особенно губительно воздействует на молодые саженцы в питомниках, на плантациях и в условиях естественного возобновления, а также на взрослые

деревья в сочетании с другими факторами, приводящими к их ослаблению. Сообщалось о замедлении роста и изменениях в росте молодых саженцев дуба черешчатого [5]. Однако в настоящее время нет данных о замедлении роста более старых деревьев с умеренным поражением.

Влияние погодных факторов на степень заражения дубов мучнистой росой обсуждается с момента первых эпидемий этого заболевания, начавшихся в начале XX века. Исследования того времени показали, что внезапная вспышка поражения в Европе после нескольких десятилетий редкого возникновения заболевания могла быть обусловлена исключительно благоприятными погодными условиями, наблюдавшимися в 1907-1908 годах. Ученые предположили, что сочетание температуры, влажности и других климатических факторов создало идеальные условия для развития гриба *Erysiphe alphitoides*, вызывающего мучнистую росу [5].

В последующие годы наблюдались колебания в интенсивности заболевания, что также указывало на связь с климатическими условиями. Тем не менее, несмотря на это, не удалось выделить явных последовательных погодных факторов, которые можно было бы однозначно идентифицировать как ключевые для объяснения динамики заражения. Это свидетельствует о том, что влияние климата на распространение мучнистой росы может быть сложным и многогранным.

Следует отметить, что мучнистая роса быстро распространилась по всем европейским странам и другим континентам, успешно адаптируясь к различным экологическим условиям. С тех пор этот гриб обосновался во всех регионах, где произрастают его основные хозяева — листовые дубы, что подтверждает его устойчивость и расширяемость в самых разных климатических условиях - от северных территорий Скандинавии до южных стран и Восточной Европы.

Л.В. Ширнина провела обширное исследование, посвящённое вредоносности мучнистой росы дуба черешчатого (*Erysiphe alphitoides*), выявив увеличение поражённых деревьев с каждым годом. В её работах отражена зависимость урожайности дуба черешчатого от интенсивности развития заболевания. Анализируя результаты её исследований, можно сделать вывод о устойчивом снижении продуктивности дубрав в условиях активного распространения мучнистой росы, что подчёркивает важность разработки и внедрения эффективных мер борьбы с этим заболеванием. Для систематизации подходов к противодействию патогену в рамках настоящей работы был проведён анализ климатических изменений в черте города Воронеж [8].

Исследования С.В. Колмукиди показывают, что мучнистая роса обладает высокой патогенностью и способностью к активному развитию при благоприятных климатических условиях. Среди косвенных факторов, стимулирующих развитие заболевания, ключевую роль играют тёплая погода и достаточная влажность, поскольку именно эти параметры создают оптимальную среду для увеличения количества конидий возбудителя [6].

М.М. Левитин в своих работах проанализировал взаимосвязь развития растительных болезней, включая мучнистую росу, с изменениями климатических условий. Исследования на северо-западе России показали, что увеличение среднегодовой температуры и количества атмосферных осадков приводит к учащению вспышек мучнистой росы у ячменя. Этот пример подчёркивает прямую связь между ростом температуры и активным распространением патогена [7].

Развитие мучнистой росы на дубе черешчатом позволяет отнести её к числу самых вредоносных заболеваний древесных растений. Согласно исследованиям Л.В. Ширниной, интенсивное развитие болезни тесно связано с уменьшением урожайности дубрав Воронежской области. Косвенным показателем этой взаимосвязи служит снижение или отсутствие урожая в годы пиковой активности патогена, что подтверждает необходимость комплексного подхода к защите дубовых насаждений [8].

Существенный вклад в изучение патогено-комплексов древесных пород внесла М.А. Томошевич. В её докторской диссертации была впервые составлена сводка данных по патогенам для Сибири, а также проанализирована динамика развития мучнисторосяных грибов. Установлено, что повышение температур в весенне-летний период способствует увеличению числа конидий и ускорению развития патогена. Важной закономерностью, выявленной в её исследованиях, является влияние сдвига фенологических фаз на развитие мучнистой росы: это может как угнетать патоген, так и провоцировать вспышки эпифитотий [9].

Работы О.Ю. Емельяновой подчёркивают важность фенологических наблюдений в изучении патогенов древесных пород. Она акцентирует внимание на том, что в разные фазы вегетации растений агрессивность патогенов может значительно усиливаться, что представляет серьёзную угрозу стабильности лесных экосистем. Эти наблюдения указывают на необходимость учёта фенологических особенностей в разработке мер контроля за развитием грибковых заболеваний [10].

Обобщая данные из литературных источников, можно утверждать, что развитие мучнистой росы напрямую связано с изменением климатических условий. Поддержка оптимальной температуры и влажности в тёплый период года создаёт предпосылки для активного спороношения патогена и поражения древесных растений, что требует системного подхода к защите лесных массивов, включая старовозрастные дубравы.

Виды мучнистой росы с широким географическим ареалом способны находить благоприятные условия для своего развития практически в любом месте в определенные периоды года. Этот феномен объясняется колоссальным потенциалом к спорообразованию и распространению, который позволяет им воспользоваться благоприятными периодами для быстрого увеличения численности и охвата новых территорий. В связи с этим особое внимание следует уделить микроклимату, который может быть не менее важен, чем общий региональный климат. Этот фактор объясняет, почему предыдущие исследования не смогли четко определить благоприятные климатические или микроклиматические условия для

развития мучнистой росы на дубах, исходя из годовых колебаний заболеваемости и экспериментальных данных.

Таким образом, для более глубокого понимания влияния погодных факторов на распространение мучнистой росы требуется всесторонний анализ как макро-, так и микроклиматических условий, что позволит более точно определить оптимальные условия для распространения *Erysiphe alphitoides* и разработать эффективные меры по контролю этого заболевания.

При обследовании дубрав в Воронеже было отмечено, что в случаях проявления мучнистой росы далеко не всегда удается обнаружить плодовые тела грибов рода *Microspore*. Несмотря на длительное совместное развитие деревьев-хозяев и грибных патогенов, заражение мучнистой росой может вызывать значительный ущерб. Например, уровень ассимиляции на пораженных листьях может снижаться до 3,5 раз, а устьичная проводимость возрастать в 1,6 раза, что при сильном поражении (более 60%) может привести к гибели растений. Это заболевание особенно опасно для ослабленных или старых деревьев в городских условиях [11].

Целью данного исследования является выявление взаимосвязи между климатическими факторами и распространением мучнистой росы (*Erysiphe alphitoides*) на дубе черешчатом в Воронежской Нагорной Дубраве.

Материалы и методы исследования

Объектом данного исследования является мучнистая роса (*Erysiphe alphitoides*), поражающая дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), произрастающий на территории Воронежской Нагорной Дубравы. Территория изучения представляет собой старовозрастные дубравные насаждения, где дуб черешчатый является доминирующей лесобразующей породой. Учитывая значимость данного лесного массива и ключевую роль дуба в экосистеме, изучение состояния насаждений в условиях роста распространенности грибковых заболеваний является актуальной задачей.

Для получения данных по зараженности деревьев мучнистой росой, было проведено исследование 80 случайно отобранных экземпляров дуба че-

решчатого с видимыми признаками поражения патогеном. Подбор деревьев осуществлялся на участках с различными микроклиматическими условиями и степенью увлажненности почвы.

Методы сбора и анализа данных

В основе методологии исследования лежал адаптированный способ улавливания конидий мучнистой росы, описанный в работе С.В. Колмукиди, применяемый для оценки интенсивности спороношения грибов в условиях естественных лесных экосистем. Метод включал использование предметных стекол с нанесенными агаровыми полосками, которые обеспечивали задержку спор в процессе их перемещения в воздушной среде. Установку стекол проводили непосредственно в кронах исследуемых деревьев, закрепляя их на ветвях с помощью конструкций из проволоки.

Далее, собранный материал подвергался исследованию с использованием счетной камеры Горяева. Подсчет числа конидий осуществлялся в заданном объеме суспензии, что позволило определить интенсивность спороношения на различных стадиях развития грибка. Методология позволяет фиксировать количество спор в краткосрочный период и оценивать патогенность заболевания в зависимости от климатических условий и этапа вегетационного сезона.

Полученные данные, отображающие уровень спороношения, обеспечивают понимание влияния грибкового патогена на насаждения, а также служат основой для практических рекомендаций по применению оздоровительных мероприятий.

Для анализа влияния мучнистой росы на продуктивность дуба черешчатого был проведен сравнительный анализ урожайности желудей в зависимости от степени развития заболевания. Учет урожайности позволил оценить, как уровень поражения деревьев влияет на способность дерева к репродукции. Сильное поражение крон грибом *Erysiphe alphitoides* приводит к снижению фотосинтетической активности и ослабляет общее физиологическое состояние деревьев, что, в свою очередь, может оказывать отрицательное влияние на формирование плодов.

Параллельно был проведен анализ климатических данных за два базовых периода (1961–1990

гг. и 1991–2020 гг.) для установления взаимосвязи между изменением среднегодовых температур, динамикой выпадения осадков и интенсивностью поражения деревьев мучнистой росой. В основе анализа лежала сравнительная оценка климатических параметров, что позволило выявить устойчивые тенденции в климатических изменениях и их влияние на развитие патогенов в изучаемой экосистеме.

Для выполнения данного исследования проведён также анализ научных публикаций, посвящённых изучению мучнистой росы в условиях Воронежской Нагорной Дубравы, а также произведён сбор и обработка климатических данных, предоставленных официальными источниками, включая материалы Главной геофизической обсерватории и данные научно-прикладного справочника «Климат России».

Результаты и их обсуждение

Анализ состояния лесных ресурсов региона позволяет отнести его к категории лесодефицитных. Наблюдается ежегодное сокращение площадей лесных насаждений, при этом в лесном фонде ярко выражена тенденция к уменьшению доли дуба. Это явление связано с циклическим процессом усыхания дубрав, который наблюдается в течение последних ста лет. За этот период зарегистрировано три волны наиболее интенсивного отмирания дуба, происходившие в 1895-1911, 1928-1945 и 1964-1983 годах, что объясняется комплексом неблагоприятных экологических факторов [6].

Воронежская Нагорная Дубрава расположена в пределах правого берега реки Воронеж, к северу от города Воронеж, и представляет собой уникальный лесной массив с разнообразной флорой и фауной. Лес начинается непосредственно на городской территории, из-за чего испытывает постоянное воздействие антропогенных факторов. Его близость к городу обуславливает высокую рекреационную нагрузку, загрязнение окружающей среды, изменение природного ландшафта и формирование ряда экологических проблем, связанных с деятельностью человека. Несмотря на это, Нагорная Дубрава остаётся важным природным объектом, выполняющим экологические, рекреационные и образовательные функции, а также требует особого внимания в плане

сохранения и рационального использования её ресурсов. Площадь данной территории составляет 7027,7 га.

Дубовые насаждения Нагорной Дубравы представляют собой основу лесного массива и являются одним из главных природных богатств данной территории. Преобладающим видом здесь выступает дуб черешчатый (*Quercus robur*) (85% от общей площади леса), который образует старовозрастные лесные участки, формирующие характерный ландшафт этой местности. Наиболее продуктивные дубняки (250-300 м³/га), занимающие около одной четверти площади, встречаются в хорошо увлажнённых местах на суглинках. Помимо дуба, в древостоях часто встречаются примеси других древесных пород, таких как клён остролистный (*Acer platanoides*), липа мелколистная (*Tilia cordata*), ясень высокий (*Fraxinus excelsior*), а также отдельные экземпляры берёзы и осины. Состояние древесного покрова лесов подвержено влиянию различных заболеваний древесных насаждений. Мучнистая роса представляет собой одно из распространённых микозных заболеваний дуба черешчатого (*Quercus robur*), вызываемое грибом *Erysiphe alphitoides*. Это заболевание проявляется в виде белого налета на листьях растений [12].

Согласно данным лесопатологического мониторинга, проведённого в 2020 году, установлено, что около 60% деревьев в лесном массиве Воронежской Нагорной Дубравы демонстрируют признаки повреждения мучнистой росой. Отмечено, что инфекция активно распространяется на лиственных породах, среди которых наиболее восприимчивым является дуб черешчатый (*Quercus robur*). Основные причины интенсивного развития патогена — благоприятные для него климатические условия, которые складываются под воздействием резких изменений погоды. Особенно высокое развитие заболевания наблюдается в периоды чередования жарких солнечных дней с прохладными и дождливыми, что создаёт оптимальную среду для роста и размножения грибов.

Установлено, что высокая влажность почвы и воздуха, в сочетании с достаточным теплом, значительно ускоряет инфекционные процессы, способствует образованию большего количества конидий и

активному инфицированию новых участков древесного покрова. Недостаточная вентиляция в плотных насаждениях также создаёт дополнительные условия для сохранения избыточной влажности на листьях и ветвях, что увеличивает риск поражения.

Мучнистая роса приводит к серьёзным нарушениям физиологических процессов у деревьев. Постепенное снижение фотосинтетической активности в результате заболевания сказывается на общем состоянии деревьев: ослабляются обменные процессы, нарушается рост (особенно у молодых деревьев), снижается способность к естественному восстановлению. Кроме того, поражённые деревья теряют зимостойкость, становятся менее устойчивыми к другим биотическим и абиотическим факторам, таким как вредители и засухи.

Для анализа динамики изменения температуры воздуха в регионе были использованы метеорологические данные, предоставленные метеостанцией г. Воронеж (станция № 34123 – Воронеж). В рамках исследования для изучения климатических

изменений были выбраны два базовых временных периода: 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг. Для оценки температурных изменений использовались среднемесячные значения температуры воздуха.

Для анализа изменения температуры воздуха в регионе были собраны и исследованы данные с метеостанции г. Воронеж, а именно станция 34123-Воронеж. При изучении изменения климатических условий для сравнения температур были взяты два базовых периода с 1961 по 1990 гг. и с 1991 по 2020 гг. Для анализа температурных изменений были взяты среднемесячные значения. На Рисунке 1 графически отображены изменения среднемесячных температур воздуха за два основных периода. На диаграмме видно, что по всем месяцам происходит потепление в холодный и тёплый период. Лето в регионе с каждым годом становится все более жарким, зима не такой суровой и снежной.

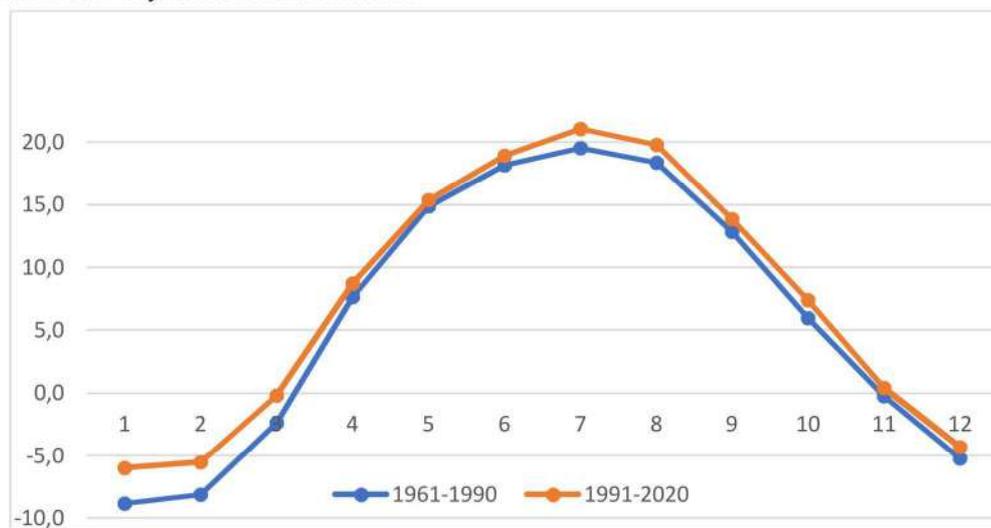


Рисунок 1. Изменения среднемесячных температур воздуха Воронежской области за два основных периода

Figure 1. Changes in the average monthly air temperatures of the Voronezh Region for two main periods of time

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Для более глубокого и детального исследования динамики температурных изменений в регионе был проведён анализ ежегодных изменений

среднемесячных температур за тёплый период (апрель–сентябрь) за расширенный временной интервал с 1950 по 2023 год. Данный период охватывает как середину XX века, так и начало XXI века, что

позволяет проследить долгосрочные климатические тренды на фоне глобального потепления и региональных климатических особенностей.

Для анализа использовались данные наблюдений, собранные с метеостанций региона. Среднемесячные температуры за тёплые сезоны каждого года были обобщены и проанализированы для

выявления тенденций изменения климатических условий. Полученные данные представлены в виде временных рядов, отражающих многолетние колебания средней температуры за анализируемый период, их график представлен на (Рисунке 2).

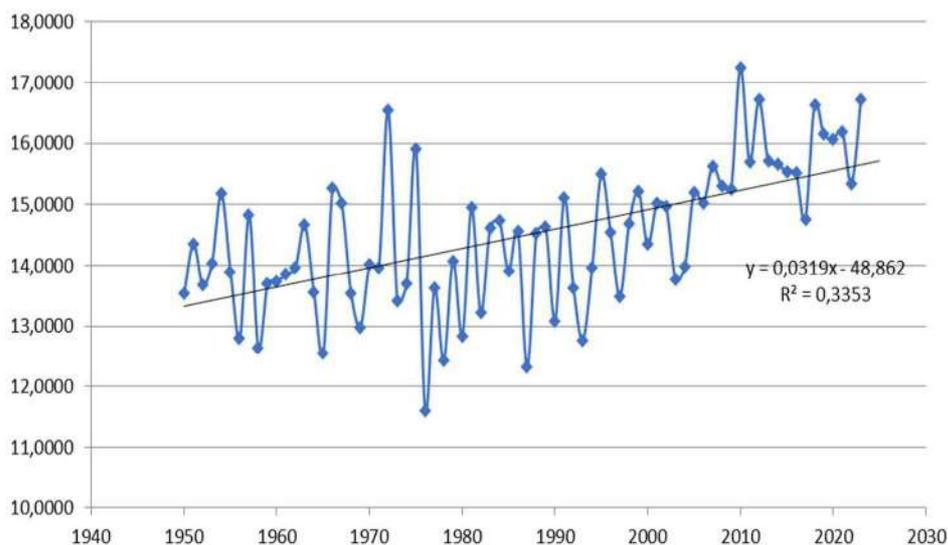


Рисунок 2. Изменение температуры воздуха в теплый период на территории Воронежской области
Figure 2. Changes in air temperature during the warm period in the territory of the Voronezh Region

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Результаты климатического анализа свидетельствуют о наличии устойчивого роста среднемесячных температур за теплый сезон. Наиболее заметным трендом является увеличение средней температуры летних месяцев (июнь–август), которое наблюдается с конца XX века и продолжается в XXI веке. Ключевыми изменениями стали увеличение числа жарких дней, сопровождающееся повышением уровня температурных аномалий, что может быть связано как с глобальными процессами потепления атмосферы, так и с региональными факторами, такими как изменение ландшафтной структуры, урбанизация и другие антропогенные воздействия.

Проанализированные данные также выявили сокращение частоты прохладных летних сезонов и увеличение продолжительности высокотемпературных периодов. Рост температуры в рассматриваемом временном интервале оценивается в среднем на $+1,5-2^{\circ}\text{C}$, в зависимости от месяца и конкретного года. Кроме того, наблюдается тенденция к удлинению теплого сезона за счёт более раннего наступления весеннего потепления и смягчения осенних холодов.

Подобные тенденции изменяющихся температур имеют серьёзные последствия для экосистем региона. Для тёплого периода это может выражаться в изменении состава и структуры растений, почвенной деградации, сокращении биоразнооб-

разия и усилении процессов сушения под влиянием более высоких летних температур. Адаптация природных и антропогенных систем к изменяющимся климатическим условиям требует дополнительного изучения факторов воздействия, а также разработки стратегий реагирования, направленных на снижение негативных климатических последствий.

Таким образом, прослеживается тенденция изменения климата в теплый период. Можно заметить, что лето до 1970 года немного прохладнее, чем после 1990 годов. С 2000 года фиксируется постоянное повышение среднегодовых температур в теплый период. Линия тренда отображает ежегодное повышение среднемесячных температур. Мы видим, что с 1972 года был зафиксирован резкий

скачок. Именно с этого года наблюдается потепление по всему региону.

Температурный максимум был зафиксирован в 2010 году. В этот же год фиксируется понижение количества осадков по всему региону. Важно отметить, что последнее десятилетие может стать самым теплым за все периоды среднегодовых температур в регионе. С 2010 по 2023 год среднегодовые температуры теплого периода не падают ниже 15 С_о. В сравнении с первым базовым периодом, можно сделать вывод, что происходит повышение среднегодовых температур более чем на 1 С_о.

В таблице 1 отображены среднесуточные температуры воздуха в г. Воронеж за исследуемый период.

Таблица 1
Климатические показатели температуры воздуха г. Воронеж в период 14.06-26.06 (2019-2023 гг.)

Table 1
Climatic indicators of air temperature in g. Voronezh in the period 14.06-26.06 (2019-2023.)

Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

Исследуемый год/ The year under study	14.06	15.06	16.06	17.06	18.06	19.06	20.06	21.06	22.06	23.06	24.06	25.06	26.06	Total/ Итого
2019	19,2	21,5	19,4	21,1	21,9	22,5	24,24	25,6	25,9	27,1	25,4	22,7	20,3	22,815
2020	20,6	20,2	23,1	23,8	25,2	25,1	23,4	24,1	21,8	20,1	17,7	19,2	20,9	21,938
2021	20,9	22,5	19,8	20,9	21,2	22,22	22,8	25,2	27,3	28,2	28,8	28,1	28,5	24,323
2022	20,20	17,3	18,18	18,5	18,9	19,9	24,1	25,4	21,3	17,8	20,20	21,7	23,8	20,515
2023	15,1	17,2	20,20	22,3	21,21	18,9	19,6	18,1	17,8	19,3	21,2	17,9	16,2	18,815
Ср. знач. по датам/ Average value by date	19,16	19,74	20,1	21,32	21,6	21,7	22,8	23,68	22,82	22,5	22,62	21,9	21,9	21,682

Исследования проводились в период с 14 июня по 26 июня. Самым жарким периодом зафиксирован 2021 год. В этот год среднее значение по температуре воздуха в исследуемый период составила +24,3 С_о. Самым холодным – 2023 год. Самые большие среднесуточные температурные колеба-

ния фиксируются в 2022 году, когда среднее температурное значение достигло +20,5 С_о. Данные климатические показатели в ходе исследования должны стать наглядным индикаторам влияния температур на патогенность мучнистой росы.

При изучении изменений климатических особенностей территории региона одним из важ-

ных показателей считаются осадки. В Воронежской области происходит неоднородное изменения выпадения осадков по всему региону. Наблюдения проводилось в сравнении двух базовых периодов с 1950 по 2020 годы. Изменения отслеживались в летнее время. По отношению к периоду 1961-1990 годы при анализе выпадения осадков на территории Воронежской области были зафиксированы изменения.

В летнее время зафиксировано уменьшение количество осадков в период 1991-2020 по сравнению с 1961-1990 гг. На территории области зафиксировано резкое снижения количества осадков.

Интересный факт, что при уменьшении количества по региону, на территории городского округа было зафиксировано повышение осадков. Можно сделать вывод, что довольно теплое и влажное лето в черте города влияет на патогенность мучнистой росы в Воронежской Нагорной Дубраве.

Одним из ключевых параметров, позволяющих оценить влияние климатических условий на развитие фитопатогенов, является гидротермический коэффициент. Данный показатель служит для количественной характеристики соотношения температуры и влажности, двух базовых факторов, которые определяют биологическую активность возбудителей болезней, включая грибы-патогены, вызывающие мучнистую росу.

ГТК – это комплексный показатель, отражает отношение суммы осадков за конкретный период к уменьшенной в 10 раз сумме температур выше +10°C:

$$\text{ГТК} = \frac{P}{\sum T_{>10^{\circ}\text{C}} 0,1} \quad (1)$$

По Г.Т. Селявину [13] выделяют следующие пределы коэффициента:

- 1) ГТК \geq 1,6 – Увлажнение избыточное, в том числе зоны дренажа;
- 2) 1,3-1,6 – Достаточное увлажнение территории;
- 3) 1,0-1,3 – Слабозасушливые зоны;
- 4) 0,7-0,9 – Засушливые территории;
- 5) 0,5-0,7 – Сухие территории;
- 6) ГТК $<$ 0,5 – очень засушливые условия.

В качестве исходных данных для расчета гидротермического коэффициента нами были использованы данные наблюдений среднемесячной температурой воздуха и количеством осадков на станции 34123-Воронеж с 1950 по 2023 годы.

Полученные данные наглядно демонстрируют, что на территории города увеличивается увлажнение территории. Интересно, что областные центры южной части области, наоборот переходят в пределы более засушливых зон. Это можно объяснить тем, что на территории региона с каждым годом все чаще встречается одно из неблагоприятных метеорологических явлений – сильная жара.

Согласно показателям, приведённым в Таблице 2, количество осадков в Воронежской Нагорной Дубраве в период с 14 июня по 26 июня (2019–2023 гг.) характеризуется заметной неоднородностью.

Климатические показатели среднесуточных атмосферных осадков г. Воронеж в период 14.06-26.06
(2019-2023 гг.)

Climatic indicators of average daily atmospheric precipitation in g. Voronezh in the period 14.06-26.06
(2019-2023.)

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Исследуемый год/The year under study	14.06	15.06	16.06	17.06	18.06	19.06	20.06	21.06	22.06	23.06	24.06	25.06	26.06	Total/Итого
2019	0	9,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7
2020	2,7	2,9	0	0	0	0	2,9	0	0	1	9,7	0	0	1,4769
2021	5,3	0	4,1	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7692
2022	0,9	2,1	0	0	0	0	0	0	0,3	0,9	1,2	0	0	0,4154
2023	0,4	1	0,1	0	0	0	0	0	0	6,1	0	0	0,5	0,6231
Average value by date/ Ср. знач. по датам	1,8 6	3,0 2	0,8 4	0,1 2	0	0	0,5 8	0	0,0 6	0,0 1,6	2,1 8	0	0,1	0,7969

Это связано с особенностями резко континентального климата региона, при котором малое количество осадков в летний период является типичным явлением. Однако анализ ежесуточных осадков показывает значительные межгодовые различия, отражающие влияние аномальных метеорологических условий, характерных для последних десятилетий.

Наибольшее количество осадков за исследуемый пятилетний период было зафиксировано в 2020 году — среднесуточная сумма осадков составила 1,48 мм. Этот год выделяется тем, что осадки наблюдались в несколько дней исследуемого периода, причём на одну дату (20 июня) пришлось сразу 9,7 мм осадков, что значительно выше среднестатистического уровня для этого временного интервала. Это свидетельствует о кратковременных, но интенсивных дождях, характерных для региона в условиях неустойчивого летнего климата.

Наиболее сухим оказался 2022 год, когда среднесуточная сумма осадков составила всего 0,42 мм. Осадки в этот год выпадали крайне редко и имели минимальную продолжительность. Подобная тенденция характерна для южных регионов Воронежской области, которые с каждым годом всё чаще подвергаются воздействию засушливых условий, что вызвано общим потеплением климата. Для сравнения, в 2023 году количество осад-

ков также оказалось довольно низким, за исследуемый период было зарегистрировано всего 0,63 мм.

Средние значения по датам показывают, что осадки более равномерно распределялись лишь в отдельные дни, такие как 15 июня и 23 июня, когда фиксировались кратковременные, но относительно интенсивные осадки. Напротив, на протяжении большей части исследуемого периода дождей не наблюдалось, что подчёркивает крайне нестабильный характер выпадения осадков на территории региона.

Данные таблицы также показывают чувствительное влияние малой увлажнённости летнего периода на экосистему Воронежской Нагорной Дубравы. Недостаток влаги в сочетании с повышением температуры создаёт неблагоприятные условия для произрастания растений и способствует активному развитию фитопатогенов, таких как мучнистая роса. Отмеченная неоднородность осадков в исследуемом периоде требует дальнейшего изучения, чтобы более точно оценить климатические факторы влияния на биоразнообразие и здоровье лесных экосистем в условиях изменения климата.

На рисунке 3 представлены результаты расчётов гидротермического коэффициента (ГТК), выполненных на основе данных метеостанции

№34123 (г. Воронеж) за два базовых климатических периода. Анализ полученных данных позволяет выявить существенное изменение значения ГТК в пределах городского округа Воронеж во втором базовом периоде (1991–2020 гг.) по сравнению с первым (1961–1990 гг.).

Повышение ГТК объясняется влиянием урбанизированной среды, где усиливается парниковый эффект из-за высокой концентрации загрязняющих веществ и антропогенного воздействия. Эти факторы способствуют увеличению влажности воздуха и интенсивности локальных осадков в черте города, в то время как окружающие сельские территории остаются более засушливыми. Таким образом, городской микроклимат формирует более влажные и тёплые условия, что и способствует росту значений гидротермического коэффициента.

Данная климатическая динамика оказывает благоприятное воздействие на развитие патогенности таких фитопатогенов, как грибки, вызывающие мучнистую росу. Условия повышенной влажности в сочетании с умеренными температурами создают идеальную среду для активного спороношения и распространения болезни. Изменения в значениях ГТК, наблюдаемые в пределах городской экосистемы, подчёркивают значимость локальных факторов климата и их влияние на биоразнообразие. Подобная тенденция требует дополнительного внимания при разработке мероприятий по сохранению и защите растительного покрова в условиях изменяющихся климатических и антропогенных воздействий.

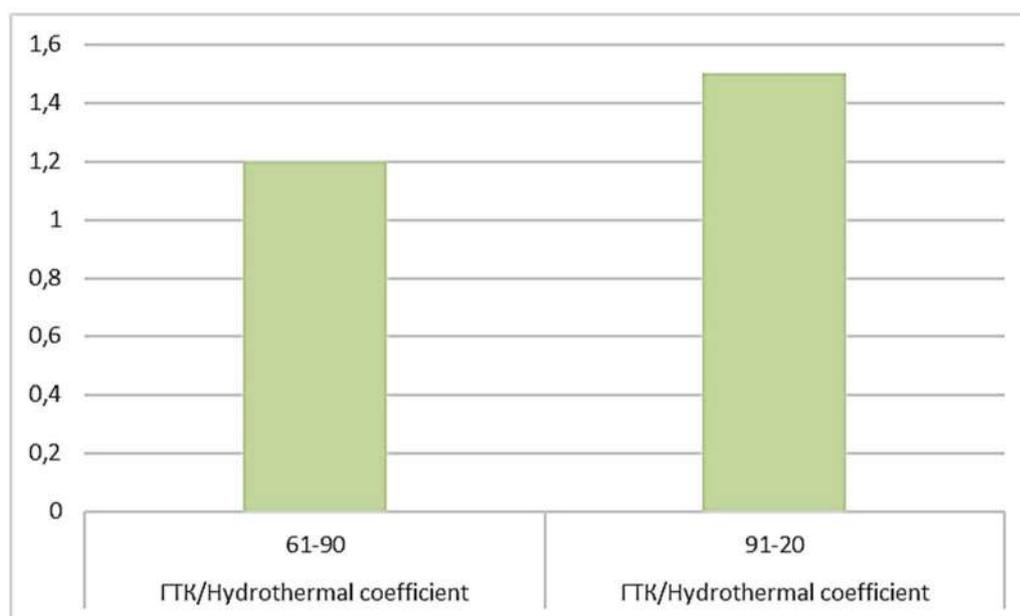


Рисунок 3. Диаграмма изменений значения ГТК Воронежской области за два базовых периода

Figure 3. Chart of changes in the value of the State Customs Committee of the Voronezh Region for two base periods

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

На территории города Воронеж в период с 1991 по 2020 годы зафиксировано превышение значений гидротермического коэффициента (ГТК), что свидетельствует об изменении климатических условий в сторону увеличения степени

увлажнённости территории. Подобная трансформация гидротермического режима предполагает улучшение условий для развития патогенов, в частности возбудителей мучнистой росы. Следовательно, можно сделать вывод, что сложившиеся климатические изменения создают благоприятные предпосылки для активного распространения данного заболевания растений.

Естественные науки и лес

Сводная диаграмма зависимости лета конидий от климатических показателей в период 14.06–26.06 (2019–2023 гг.) (рис.4) демонстрирует корреляцию между активностью спороношения патогенов (выраженной в количестве конидий, зафиксированном в указанный временной интервал) и климатическими условиями, такими как температура воздуха, уровень осадков, влажность и гидротермический коэффициент (ГТК). На горизонтальной оси (ось X) располагается временной интервал лет (годы от 2019 до 2023), а на вертикальной оси (ось Y) представлены показатели активности лета конидий и климатические параметры. Диаграмма совмещает несколько линий или столбцов, отражающих динамику ключевых климатических факторов и параллельное изменение интенсивности спороношения. Общий характер диаграммы позволяет выделить следующие закономерности:

- Увеличенная активность лета конидий наблюдается в годы с повышенной влажностью и

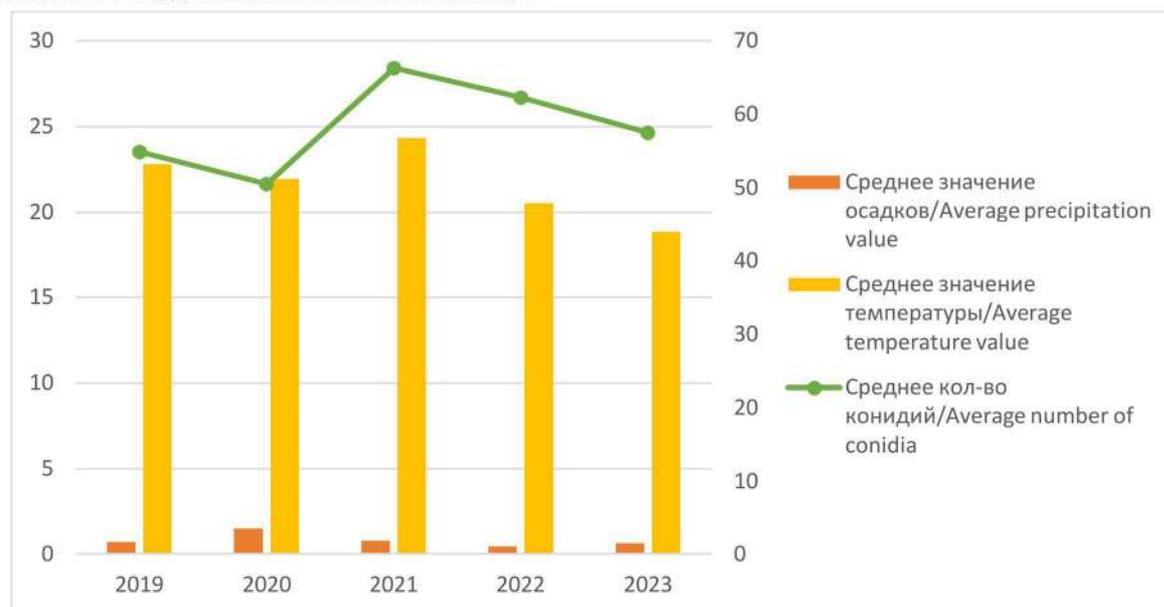


Рисунок 4. Сводная диаграмма зависимости лета конидий от климатических показателей в период 14.06-26.06 (2019-2023 гг.)

Figure 4. Summary diagram of conidia summer dependence on climate indicators in the period 14.06-26.06 (2019-2023)

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

В результате проведенного исследования по улавливанию конидий возбудителя мучнистой

увеличением ГТК, особенно в периоды стабильно высоких температур.

- Напротив, в годы с засушливыми условиями (уменьшение ГТК и осадков) активность конидий значительно снижается.

- Температура также играет важную роль, поддерживая или угнетая динамику спороношения в зависимости от её значений в исследуемый период.

Таким образом, данная диаграмма наглядно иллюстрирует влияние климатических факторов

на динамику лета конидий в изучаемый временной промежуток. Это позволяет сделать выводы о причинах колебаний активности патогенов, связанных с климатическими изменениями, и прогнозировать их развитие в зависимости от погодных условий.

Естественные науки и лес

связано с аномально прохладным летом, характерным для данного региона. Дополнительным фактором, способствовавшим сокращению спороношения в 2020 году, стало неравномерное распределение осадков. В исследуемом периоде общее количество осадков оказалось низким, причем большая их часть (9,7 мм) выпала на один день — 24 июня.

Максимальная активность спороношения была зафиксирована в 2021 году. Это объясняется сочетанием благоприятных климатических условий: равномерной влажности воздуха, низкого количества атмосферных осадков и стабильных температур. В указанный период процесс лета конидий в конце июня отличался постепенным и плавным нарастанием, достигая наиболее высоких величин. Эти условия способствовали усилению патогенных свойств возбудителя мучнистой росы, что обусловлено повышенной активностью формирования и распространения конидий.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим интенсивность лета конидий, является повышение температуры воздуха в летний период.

Более ровный и стабильный температурный режим усиливает патогенные свойства возбудителя. Вторым значимым показателем выступает влажность территории, которая обуславливает развитие патогена. При этом наблюдается обратная зависимость: при снижении общего количества осадков увеличивается активность лета конидий. Однако при избыточных и постоянных осадках развитие и распространение патогена затрудняется либо становится невозможным, так как избыточное увлажнение создает неблагоприятные условия для спороношения. Таким образом, сочетание стабильных температурных условий и умеренной влажности способствует усилению процесса лета конидий и повышению патогенности возбудителя мучнистой росы.

Таблица 3 содержит данные о количестве конидий, зафиксированных на предметных стеклах модельных деревьев в исследуемый период (с 14 по 26 июня) разных лет (2019–2023). Представленные значения демонстрируют динамику спороношения возбудителя мучнистой росы в условно летний период по годам, а также позволяют выделить общие тенденции.

Таблица 3

Количество конидий, зафиксированные на предметных стеклах модельных деревьях в исследуемый период

Table 3

The number of conidia recorded on slides of model trees during the study period

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Исследуемый год/The year under study	14.06	15.06	16.06	17.06	18.06	19.06	20.06	21.06	22.06	23.06	24.06	25.06	26.06	Итого/Total
2019	56	60	58	46	64	52	45	57	50	62	42	68	54	54,92
2020	49	40	56	32	50	35	50	54	68	60	51	50	62	50,54
2021	59	58	56	92	65	87	58	51	78	68	72	36	82	66,31
2022	58	68	79	72	67	59	82	56	60	56	54	50	49	62,31
2023	65	60	46	58	64	62	67	42	65	50	63	54	52	57,54
Average value by date/ Ср. знач. по датам	57,4	57,2	59	60	62	59	60,4	52	64,2	59,2	56,4	51,6	59,8	58,32

Особое внимание следует обратить на 17 июня 2021 года, когда зафиксировано максимальное количество конидий (92) на предметных стеклах за

весь исследуемый период. Этот показатель значительно отличается от среднего значения для данной

даты (60 конидий) и указывает на высокую интенсивность спороношения в конкретный день. В целом, 2021 год характеризовался наиболее активным спороношением, о чём свидетельствует наибольшее среднегодовое значение – 66,31, что значительно превысило аналогичные показатели других лет.

- 2019 год – количество конидий колеблется от 42 до 68, со среднегодовым значением 54,92. Показатели относительно стабильны, однако активность спороношения в этот год уступает пиковым значениям других лет.

- 2020 год – зафиксировано снижение средней активности (среднегодовое значение 50,54) в сравнении с 2019 годом. Минимум приходится на 17 июня (32 конидии), что коррелирует с прохладным и неблагоприятным летом для развития патогена.

- 2021 год демонстрирует максимальные показатели среди всех исследуемых лет. Высокая плотность конидий была зафиксирована на протяжении всего периода, с пиковой активностью в 92 конидии 17 июня.

- 2022 год – число конидий остаётся относительно высокими на протяжении периода (среднегодовое значение 62,31). Динамика показывает сравнительно равномерную активность спороношения.

- 2023 год – зафиксированы умеренные значения количества конидий с небольшими колебаниями, среднегодовое значение составило 57,54.

Наибольшее среднее значение количества конидий зафиксировано 22 июня (64,2), что может быть связано с благоприятными метеоусловиями в этот день за все годы наблюдений. Минимальное среднее значение приходится на 25 июня (51,6).

- Динамика спороношения демонстрирует неравномерность развития, что связано с колебаниями температуры и влажности в регионе.

Таким образом:

- Показатели по годам и датам демонстрируют, что развитие патогена имеет выраженную зависимость от климатических условий. Наибольшая активность лета конидий наблюдается в 2021 году, что связано с благоприятными климатическими факторами – равномерной влажностью и стабильной температурой.

- Максимальное количество конидий зафиксировано 17 июня 2021 года (92 конидии), что значительно превышает средние значения как для данной даты, так и для всего периода, что подтверждает высокую патогенность в данный год.

- Среднегодовые значения, а также динамика лета конидий для каждого года соотносятся с общей тенденцией: более равномерные климатические факторы (стабильность температуры и умеренная влажность) способствуют активному спороношению.

Представленная таблица демонстрирует динамику спороношения возбудителя мучнистой росы, отражая тесную связь процесса лета конидий с погодными условиями.

Изучение корреляционной зависимости патогенности конидий возбудителя мучнистой росы с климатическими факторами является сложным и многоаспектным процессом, требующим длительных и систематических исследований. Полноценный анализ воздействия изменений температуры, влажности, количества осадков и других метеорологических параметров на динамику развития и интенсивность спороношения возбудителя возможен только на основе многолетних наблюдений, охватывающих временные периоды, достаточные для выявления устойчивых закономерностей. Долгосрочные исследования позволяют не только определить условия, наиболее благоприятные для спороношения и активизации патогенности, но и прогнозировать возможные изменения биологии возбудителя в условиях нынешних и будущих климатических изменений.

Климатические факторы играют ключевую роль в формировании благоприятной среды для развития таких заболеваний, как мучнистая роса. Анализ существующих данных свидетельствует о высокой чувствительности возбудителя к колебаниям температуры и влажности. В частности, умеренно-высокая влажность и стабильные температурные показатели способствуют быстрому увеличению патогенности конидий и их активному распространению среди растений-хозяев. Эти особенности требуют особого внимания, учитывая глобальные изменения климата, которые с высокой

вероятностью влияют на частоту и степень распространения грибных заболеваний.

На основе текущих результатов исследования можно сделать вывод, что разработка стратегий борьбы с мучнистой росой и защиты растительных насаждений от её негативного воздействия является первоочередной задачей сельского хозяйства, лесоводства, садоводства и ландшафтного проектирования. Активное изучение биологических свойств возбудителя, его взаимодействия с климатическими и экологическими факторами, а также разработка интегрированных методов контроля заболевания являются ключевыми направлениями научной и практической деятельности.

Борьба с мучнистой росой предполагает комплексный подход, который включает:

- мониторинг климатических условий, способствующих повышению патогенности возбудителя;
- изучение механизмов взаимодействия грибного патогена с растениями-хозяевами на физиологическом и молекулярно-генетическом уровнях;
- внедрение устойчивых к заболеванию сортов растений;
- совершенствование агротехнических мероприятий, направленных на предотвращение распространения болезни;
- разработку новых экологически безопасных средств защиты растений, минимизирующих пагубное воздействие заболевания на насаждения.

Таким образом, для преодоления угрозы, связанной с мучнистой росой, как в условиях настоящего времени, так и в долгосрочной перспективе, необходимо продолжать углублённый анализ биологических, климатических и экологических факторов, влияющих на патогенность и распространение возбудителя. Особое внимание должно быть уделено изучению воздействия заболевания на деревья, выращенные как в сельскохозяйственных экосистемах, так и на древесные насаждения в черте города. Урбанизированные территории, с их специфическими микроклиматическими условиями (повышенная температура, из-

менённая влажность воздуха, недостаток агротехнического ухода), становятся дополнительно уязвимыми перед распространением патогенных микроорганизмов, способных нанести серьёзный урон не только системам озеленения, но и городской экологии в целом.

Комплексное изучение данной проблемы, включая исследование устойчивости древесных насаждений в городах к патогену мучнистой росы, будет способствовать повышению эффективности защитных мероприятий, направленных на сохранение зелёных зон, снижение экономических потерь, а также обеспечение экологической устойчивости как агроландшафтов, так и урбанизированных экосистем. Укрепление здоровья древесных насаждений в черте города имеет стратегическое значение, поскольку они играют важную роль в поддержании качества воздуха, регулировании температуры, улучшении микроклимата и повышении эстетической привлекательности городской среды.

Заключение

В результате проведенного анализа климатических изменений в Воронежской области выявлены ключевые тенденции, оказывающие влияние на развитие и распространение грибкового заболевания дуба черешчатого, вызванного возбудителем *Erysiphe alphitoides*. Устойчивое повышение среднемесячной температуры воздуха, особенно в теплый период, в сочетании с изменением характера выпадения атмосферных осадков и увеличением влажности воздуха создаёт благоприятные условия для активизации патогенных грибов.

Долговременные исследования среднемесячного уровня осадков и температурного режима показали, что климатическая стабильность в летние месяцы второго климатического базового периода способствовала расширению зоны увлажнения, о чём свидетельствуют расчёты гидротермического коэффициента (ГТК). Если в первом базовом периоде большую часть территории характеризовала слабозасушливая зона, то во втором периоде произошёл переход к зоне достаточно увлажнённых условий. Это изменение стало ключевым фактором, способствующим усилению спороношения *Erysiphe alphitoides*.

Пятилетний мониторинг концентрации конидий гриба в летний сезон подтвердил значительное влияние температурного и влажностного режимов на биологию патогена. Наблюдалась тенденция к увеличению численности конидий с 2019 по 2021 годы, что коррелировало с ростом температуры и достаточно равномерным увлажнением. Однако уменьшение осадков в 2022–2023 годах привело к снижению концентрации спор, что ещё раз подчеркивает значимость климатических факторов для развития грибных заболеваний.

Анализ сезонного развития конидий *Erysiphe alphitoides* показал, что интенсивность проявления мучнистой росы тесно связана с термическим режимом и уровнем увлажнения вегетационного периода. Комплексное влияние данных факторов определяет пики активности патогена, позволяя прогнозировать периоды вспышек заболевания. Эти выводы подтверждают критическую важность учёта климатических параметров при планировании лесозащитных мероприятий.

Результаты исследования подчеркивают необходимость адаптации системы защиты дуба черешчатого к меняющимся климатическим условиям региона. Введение системного подхода к разработке стратегии профилактики и борьбы с грибковыми заболеваниями, включая мониторинг погодных условий, оценку биологических особенностей патогена и внедрение адаптивных мер управления экосистемами, позволит минимизировать ущерб, наносимый мучнистой росой, и повысить устойчивость дубрав к неблагоприятным климатическим трендам.

Таким образом, полученные данные создают основу для построения более точных моделей прогноза вспышек мучнистой росы, что открывает возможности для эффективного управления лесозащитными усилиями, направленными на сохранение экосистем и обеспечение их биологической стабильности в условиях усиливающихся климатических изменений.

Список литературы

1. Колмукиди, С. В. Мучнистая роса дуба в защитных лесных насаждениях Волгоградской области // Природные системы и ресурсы. – 2003. – Т. 13. – № 3. – С. 5-14. DOI 10.15688/nr.jvolsu.2023.3.1.
2. Glawe, D. A. The powdery mildews: a review of the world's most familiar (yet poorly known) plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2008; 46(1):27-51.
3. Hewitt H. G., Ayres P.G. Effect of infection by *Microspheera alphitoides* (powdery mildew) on carbohydrate levels and translocation in seedlings of *Quercus robur*. *New Phytologist.* 1976; 77(2): 379-390.
4. Hajji M., Dreyer E., Marçais B. Impact of *Erysiphe alphitoides* on transpiration and photosynthesis in *Quercus robur* leaves. *European Journal of Plant Pathology.* 2009; 125:63-72.
5. Marçais B., Desprez-Loustau M. L. European oak powdery mildew: impact on trees, effects of environmental factors, and potential effects of climate change. *Annals of Forest Science.* 2014; 71:633-642.
6. Copolovici L., Väärtnõu F., Estrada V.P., Niinemets U. Oak powdery mildew (*Erysiphe alphitoides*)-induced volatile emissions scale with the degree of infection in *Quercus robur*. *Tree Physiology.* 2014; 34 (12): 1399–1410. DOI: 10.1093/treephys/tpu091.
7. Левитин М. М. Распространение болезней растений в условиях глобального изменения климата / М. М. Левитин // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков. – 2016. – № 13. – С. 97-101.
8. Ширнина Л.В. Вредоносность возбудителя мучнистой росы дуба черешчатого и возможности её ограничения // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Материалы XI международной конференции, Петрозаводск, 10–14 октября 2022 года. – Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук, 2022. – С. 114-115.

9. Томошевич М. А. Формирование патоккомплексов древесных растений при интродукции в Сибири: специальность 03.02.08 "Экология (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Томошевич Мария Анатольевна, 2015. – 462 с.

10. 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 10.18619/2072-9146-2020-6-77-84.

11. Popova A.A., Karpechenko I.Yu., Tolbina I.A., Syromyatnikov M.Yu. Molecular identification of phytopathogenic fungi of forestforming species in the Central Black soil region: English oak (*Quercus robur* L.) and scots pine (*Pinus sylvestris* L.). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 392: 012018. (International scientific and practical conference "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" (Forestry-2019). DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012018]

12. Tsaralunga V., Tsaralunga A., Yakovenko N., Gridnev Yu. The Impact of the Intensity of Selective Sanitary Cutting in Oak Forests on the Defeat of the Pedunculated Oak (*Quercus Robur* L.) Trees by Powdery Mildew. Forestry – 2021. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021; 875, art. 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012050.

13. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата// Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. -Вып. 20.- С. 165 – 177.

14. Попова А.А., Попова В.Т. Распространение мучнистой росы в городских и пригородных насаждениях дуба черешчатого *Quercus robur* L. (Fagaceae) в Воронеже // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О.А. Катаева): Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 24-27 ноября 2020 года / Под редакцией Д.Л. Мусолина, Н.И. Кириченко и А.В. Селиховкина. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2020. – С. 265-266.

15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621470 Российская Федерация. "Научно-прикладной справочник "Климат России": № 2020620899; заявл. 09.06.2020; опублик. 18.08.2020 / В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации - Мировой центр данных".

16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научное издание, 2022. – 124 с.

References

1. Kolmukidi S.V. *Muchnistaya rosa duba v zashchitnykh lesnykh nasazhdeniyakh Volgogradskoi oblasti* [Powdery mildew of oak in protective forest plantations of the Volgograd region]. *Prirodnye sistemy i resursy*= Natural systems and resources. 2023; 13 (3): 5-14. DOI 10.15688/nsr.jvolsu.2023.3.1. (In Russ.)

2. Glawe D. A. The powdery mildews: a review of the world's most familiar (yet poorly known) plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2008; 46(1): 27-51.

3. Hewitt H.G., Ayres P.G. Effect of infection by *Microsphaera alphitoides* (powdery mildew) on carbohydrate levels and translocation in seedlings of *Quercus robur*. *New Phytologist.* 1976; 77(2): 379-390.

4. Hajji M., Dreyer E., Marçais B. (2009). *Impact of Erysiphe alphitoides on transpiration and photosynthesis in Quercus robur leaves.* *European Journal of Plant Pathology*, 125, pp. 63-72.

3. Hewitt H. G., Ayres P.G. Effect of infection by *Microsphaera alphitoides* (powdery mildew) on carbohydrate levels and translocation in seedlings of *Quercus robur*. *New Phytologist.* 1976; 77(2): 379-390.

4. Hajji M., Dreyer E., Marçais B. Impact of *Erysiphe alphitoides* on transpiration and photosynthesis in *Quercus robur* leaves. *European Journal of Plant Pathology.* 2009; 125:63-72.

5. Marçais B., Desprez-Loustau M. L. European oak powdery mildew: impact on trees, effects of environmental factors, and potential effects of climate change. *Annals of Forest Science*. 2014; 71:633-642.
6. Copolovici L., Väärtnõu F., Estrada V.P., Niinemets U. Oak powdery mildew (*Erysiphe alphitoides*)-induced volatile emissions scale with the degree of infection in *Quercus robur*. *Tree Physiology*. 2014; 34 (12): 1399–1410. DOI: 10.1093/treephys/tpu091.
7. Levitin M.M. Rasprostranenie boleznej rastenij v usloviyah global'nogo izmeneniya klimata. Sel'skokozyajstvennye nauki i agropromyshlennyj kompleks na rubezhe vekov. [The spread of plant diseases in the context of global climate change]. *Agricultural sciences and the agro-industrial complex at the turn of the century*. 2016; 13: 97-101. (In Russ.)
8. Shirnina L.V. Harmfulness of the causative agent of powdery mildew of oak and the possibility of its limitation. *Problems of forest phytopathology and mycology: Proceedings of the XI International Conference*, Petrozavodsk, October 10-14, 2022. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2022. pp. 114-115. (In Russ.)
9. Tomashevich M. A. Formation of pathocomplexes of woody plants during introduction in Siberia: specialty 02/03/08 "Ecology (by industry)": dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences / Tomoshevich Maria Anatolyevna, 2015. 462 p. (in Russ.)
10. Yemelyanova O. Yu., Tsoi M. F., Maslova L. I. Phenological observations as the basis for the formation of a database of tree plant phenospectres. *Vegetables of Russia*. 2020; 6: 77-84. DOI 10.18619/2072-9146-2020-6-77-84. (In Russ.)
11. Popova A.A., Karpechenko I.Yu., Tolbina I.A., Syromyatnikov M.Yu. Molecular identification of phytopathogenic fungi of forestforming species in the Central Black soil region: English oak (*Quercus robur* L.) and scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;392: 012018. (International scientific and practical conference "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions" (Forestry-2019). DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012018
12. Tsaralunga V., Tsaralunga A., Yakovenko N., Gridnev Yu. The Impact of the Intensity of Selective Sanitary Cutting in Oak Forests on the Defeat of the Pedunculated Oak (*Quercus Robur* L.) Trees by Powdery Mildew. *Forestry – 2021. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 875, art. 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012050.
13. Selyaninov G.T. On the agricultural evaluation of climate. *The Works of the Agricultural Meteorology*. 1928; 20:165-177. (In Russ.)
14. Popova A.A., Popova V.T. *Rasprostranenie muchnistoi rosy v gorodskikh i prigorodnykh nasazhdeniyakh duba chereshchatogo Quercus robur L. (Fagaceae) v Voronezhe* [Distribution of powdery mildew in urban and suburban stands of petiolate oak *Quercus robur* L. (Fagaceae) in Voronezh]. Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems (XI Readings in memory of O.A. Kataev): Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation, St. Petersburg, November 24-27, 2020 / Ed. by D.L. Musolin, N.I. Kirichenko and A.V. Selikhovkin. St. Petersburg: St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2020: 265-266. (In Russ.)
15. Certificate of State registration of the database No. 2020621470 Russian Federation. "Scientific and applied reference book "Climate of Russia": No. 2020620899: application. 06/09/2020: published. 08/18/2020 / V. N. Razuvaev, O. N. Bulygina, N. N. Korshunova [et al.]; applicant Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center" (in Russ.)
16. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: Science–intensive Technologies, 2022. 124 p. (in Russ.)

Естественные науки и лес

Сведения 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: <https://orcid.org/0009-0006-1171-0368>, e-mail: o-ser00@mail.ru.

Турчанинова Елена Викторовна – старший преподаватель 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: <https://orcid.org/0009-0003-1800-240X>, e-mail: misstur@yandex.ru.

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: forest.vrn@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: <https://orcid.org/0009-0006-1171-0368>, e-mail: o-ser00@mail.ru.

Elena V. Turchaninova – Senior Lecturer at 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: <https://orcid.org/0009-0003-1800-240X>, e-mail: misstur@yandex.ru.

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, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>, e-mail: forest.vrn@gmail.com.

✉ - Для контактов/Corresponding

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/9>

УДК 630*631.53; 620.3



Использование нанопрепаратов оксида меди в качестве стерилизующих агентов на этапе введения древесных растений в культуру *in vitro*

Ольга А. Федорова¹✉, fed-olga78@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>

Надежда А. Евтушенко¹, nadya.evtushenko.94@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0099-6779>

Петр М. Евлаков¹, peter.evlakov@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

Ольга В. Захарова², olgazakharova1@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8590-2529>

Александр А. Гусев², nanosecurity@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-8699-9112>

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

²НОЦ «Экологии и биотехнологий» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», Защитный переулочек, 7, г. Тамбов, 392020, Российская Федерация

Аннотация

Одной из основных трудностей, препятствующих повсеместному внедрению технологии клонального микроразмножения для получения качественного посадочного материала древесных растений, является сложность получения асептически чистой культуры с высокой регенерационной способностью. В статье обсуждаются эффекты воздействия растворов наночастиц CuO (75-100 нм), стабилизированных поверхностно активными веществами (Твин 20, Тритон X100 и Полигексаметиленбигуанид), на этапе введения в культуру *in vitro* гибрида Т. белый × осина и березы пушистой 15-1. Предполагается, что внесение наночастиц в состав питательной среды Мурасиге-Скуга позволит снизить микробную нагрузку эксплантов, а также усилит рост и морфогенез растений. Использование растворов наночастиц не отменяет использование традиционных методов стерилизации эксплантов, а служит дополнительной мерой. В ходе проведения исследований определена оптимальная концентрация наночастиц – 5 мг/л, использование которой в составе среды культивирования позволяет повысить выход стерильных жизнеспособных эксплантов тополя на 16,7-26,7%, березы 30,0-36,7%. Установлено, что наибольшим антагонистическим действием в отношении поверхностной (эпифитной) микрофлоры обладают наночастицы, стабилизированные Полигексаметиленбигуанидом – выход микропобегов тополя и березы, пригодных для проведения дальнейших этапов микроразмножения составляет 66,7%. Использование данной комбинации наночастиц позволяет получить минимальное количество нежизнеспособных культур. Повышение показателя асептически жизнеспособных эксплантов с применением растворов наночастиц оксида меди положительно сказывается на эффективности клонального микроразмножения за счет ускорения процесса микроклонирования, сокращения времени получения готового посадочного материала, улучшения качества продукта.

Ключевые слова: клональное микроразмножение, гибрид Т. белый × осина, береза пушистая 15-1, наночастицы, оксид меди, стабилизаторы, Твин 20, Тритон X100, полигексаметиленбигуанид (ПГМБ), экспланты.

Финансирование: Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000020-6-4.1.2 «Отбор хозяйственно ценных и устойчивых к изменению климата древесных культур, отличающихся высокой биологической продуктивностью и потенциалом секвестрации углерода с учетом региональных почвенно-климатическим особенностям для реализации лесоклиматических проектов (FZUR-2023-0002)».

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Использование нанопрепаратов оксида меди в качестве стерилизующих агентов на этапе введения древесных культур в культуру *in vitro*/ О. А. Федорова, Н. А. Евтушенко, П. М. Евлаков, О. В. Захарова, А. А. Гусев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 142-157. – Библиогр.: с. 152-156 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/9>.

Поступила 19.02.2025. *Пересмотрена* 24.04.2025. *Принята* 05.06.2025. *Опубликована онлайн* 26.06.2025.

Article

Use of copper oxide nanopreparations as sterilizing agents at the stage of introducing woody plants into *in vitro* culture

Olga A. Fedorova¹ ✉, fed-olga78@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>

Nadejda A. Evtushenko¹, nadya.evtushenko.94@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0099-6779>

Peter M. Evlakov¹, peter.evlakov@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

Olga V. Zakharova², olgazakharova1@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8590-2529>

Alexander A. Gusev², nanosecurity@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8699-9112>

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

² *Scientific and Educational Center for Environmental Science and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 7, Zashitny str., Tambov, 392020, Russian Federation*

Abstract

One of the main difficulties preventing the widespread introduction of clonal micropropagation technology to obtain high-quality planting material for woody plants is the difficulty of obtaining an aseptically pure culture with high regenerative capacity. The article discusses the effects of copper oxide nanoparticle solutions (75-100 nm) stabilized by nonionic surfactants (Tween 20, Triton X100 and Polyhexamethylenebiguanide) on the stage of introducing the Poplar × aspen hybrid and downy birch 15-1 into *in vitro* culture. It is assumed that the introduction of nanoparticles into the Murasige-Skoog nutrient medium will reduce the microbial load of explants, as well as enhance plant growth and morphogenesis. The use of nanoparticle solutions does not replace traditional methods of explant sterilization, but serves as an additional measure. In the course of the research, the optimal concentration of nanoparticles was determined – 5 mg/l, the use of which in the composition of the cultivation medium allows to increase the yield of sterile viable poplar explants by 16.7-26.7%, birch 30.0-36.7%. It was established that the greatest antagonistic effect on the surface (epiphytic) microflora is possessed by nanoparticles stabilized by Polyhexamethylenebiguanide – the yield of poplar and birch microshoots suitable for further stages of micropropagation is 66.7%. The use of this combination of nanoparticles allows to obtain a minimum number of non-viable cultures. Increasing the rate of aseptically viable explants using copper oxide nanoparticle solutions has a positive effect on the efficiency of clonal micropropagation by accelerating the microcloning process, reducing the time required to obtain finished planting material, and improving the quality of the product.

Keywords: clonal micropropagation, poplar × aspen hybrid, downy birch 15-1, nanoparticles, copper oxide, stabilizers, Tween 20, Triton X100, Polyhexamethylenebiguanide (PHMB), explants.

Funding: The study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 1023013000020-6-4.1.2 «Selection of economically valuable and

climate-resistant tree crops with high biological productivity and carbon sequestration potential, taking into account regional soil and climatic features for the implementation of forest climate projects (FZUR-2023-0002)».

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to reviewing the article.

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest.

For citation: Fedorova O. A., Evtushenko N. A., Evlakov P. M., Zakharova O. V., Gusev A. A. (2025). Use of copper oxide nanopreparations as sterilizing agents at the stage of introducing woody crops into *in vitro* culture. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 142-157 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/9>.

Received 19.02.2025. *Revised* 24.04.2025. *Accepted* 05.06.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Клональное микроразмножение древесных культур в настоящее время остаётся важным инструментом для массового выращивания генетически стабильного посадочного материала, свободного от вредителей и болезней [1-3]. В некоторых случаях это единственный способ сохранить и повысить экономическую ценность определённых генетически ценных культур. Несмотря на то, что методика клонирования с помощью органов, клеток, тканей и клеточных культур нашла широкое применение, для многих видов растений она крайне затруднена. Одной из очевидных причин являются сложности получения хорошо растущей культуры, свободной от контаминирующих агентов - микроорганизмов. Поскольку питательная среда для *in vitro* выращивания растений содержит нутриенты, пригодные для роста и развития микроорганизмов, проблема стерильности сред и растительных эксплантов в биотехнологических лабораториях стоит достаточно остро [4]. Поверхностные ткани органов растений инфицированы бактериями, грибами и их спорами. В связи с этим первым шагом для получения изолированных клеток, тканей и органов растений является стерилизация растительного материала. Перед стерилизацией объекта его тщательно моют теплой водой с мылом, промывают дистиллированной водой. Для стерилизации используют широкий спектр разных стерилизующих веществ: хлорамин, коммерческий препарат «Белизна», перекись водорода, ртутные препараты (сулема), перманганат калия [5]. Правильный выбор стерилизующего вещества заключается в том, чтоб нейтрализовать микроорганизмы, которые обитают на поверхности надземных частей

растений (эпифитная микрофлора) и не повредить ткани растения. Кроме того, вещество не должно глубоко проникать в ткань и легко вымываться. Стерилизующие растворы необходимо применять в строго определенной концентрации, чтобы не вызвать некроза тканей у молодых побегов растений [6]. Применение стерилизующих агентов бывает порой недостаточной и действенной мерой по преодолению эндогенной инфекции. Многие специалисты широко используют антибиотики несмотря на то, что они не только губительно действуют на микроорганизмы, но и могут угнетать дифференциацию тканей растения [7]. Добавление в питательные среды антибиотиков зачастую приводит к резкому ухудшению приживаемости эксплантов, снижению показателей роста и развития размножаемых растений [8]. Кроме того, антибиотические вещества, активные в подавлении роста бактериальных культур, не действуют на грибную микрофлору. Поражение же грибковой инфекцией при введении в культуру *in vitro* встречается чаще, чем бактериальной. Это можно объяснить тем, что грибы менее требовательны к среде поскольку группы ферментов, которые они выделяют способствуют усвоению питательных веществ практически из любого субстрата, бактерии в этом отношении более требовательны и предпочитают расти на средах с большим содержанием органических веществ. Имеются работы [9] по использованию медицинских противогрибковых препаратов (нистатин, гризеофульвин и др.) в составе питательных сред, однако их эффективность была недостаточной.

В этой связи поиски средств, которые бы оказывали прямое антагонистическое воздействие на

процессы роста и развития микроорганизмов, составляющих основную эпифитную микрофлору вводимых культур являются актуальными.

В последнее десятилетие нанотехнологии и наноматериалы стали неотъемлемой частью современного агротехнологического процесса. Наночастицы (НЧ) металлов широко используются в сельском хозяйстве в виде микроудобрений, детекторов патогенов, фунгицидов [10, 11, 12] и пр. Металлы в форме НЧ обеспечивают более высокую проникающую способность по сравнению с более крупными частицами, обладают уникальными функциональными возможностями, электрическими и оптическими свойствами, высокой стабильностью и высокой адсорбционной способностью, что делает их перспективной формой для обеспечения растений микроэлементами [13]. Кроме того, некоторые НЧ, такие как НЧ серебра и меди обладают хорошими дезинфицирующими свойствами для эксплантов и питательных сред [14, 15].

Медь относится к группе тяжелых металлов и при этом является жизненно важным элементом, поскольку является неотъемлемой частью биохимических и физиологических процессов, протекающих в тканях растений, включая фотосинтез, дыхание, водный обмен, метаболизм белков и углеводов, а также влияет на устойчивость к грибным и бактериальным заболеваниям. Считается, что примерно 5-30 мг/кг меди является достаточным количеством в тканях растений для их правильного роста и развития [16, 17].

Из-за значительного фунгицидного потенциала наночастиц и наноматериалов исследования их возможного использования в устойчивом сельском хозяйстве в качестве альтернатив химическим фунгицидам быстро продвигаются вперед. Имеется ряд работ, показывающих, что НЧ CuO и Cu₂O могут применяться не только на стадии стерилизации эксплантов, но и в качестве фунгицидов для защиты от патогенов на разных стадиях роста и развития растений [18, 19, 20]. Так, было показано, что НЧ Cu₂O в концентрациях 10-100 мкг/л ингибировали рост мицелия *Fusarium solani* в лабораторных условиях, а также снижали заболеваемость корневой гнилью огурцов в тепличных и полевых условиях. Они

также улучшали рост и производственные характеристики огурцов, повышая активность защитных ферментов. Анатомические исследования выявили лизис мицелия, уменьшение спор и гибель *Fusarium solani*, а также увеличение толщины клеточной стенки тканей корня и мезофильной ткани растений огурцов [21]. Смеси НЧ Cu/Cu₂O в концентрациях 0,1-0,5 г/л показали высокую фунгицидную активность по отношению к *Fusarium oxysporum in vitro*, вызывая ингибирование радиального роста колонии. Наибольшая эффективность показана в смеси с высоким процентом Cu₂O [22]. Кроме того, применение НЧ Cu₂O/Cu в концентрации 0,1 г/л эффективно ингибирует рост колоний таких фитопатогенных грибов, как *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* и *Colletotrichum gloeosporioides*. Результаты показали ингибирование до 96% для *Fusarium oxysporum*, 74% для *Fusarium solani* и 89% для *Colletotrichum gloeosporioides*. В качестве механизма действия авторы предполагают выработку внутриклеточных активных форм кислорода, приводящих к низкой жизнеспособности спор [23].

Нао Y. И др. [24] в своей работе исследовали влияние сферических НЧ CuO размером 20-30 нм на возбудителя серой гнили многих растений – штамм *Botrytis cinerea* в экспериментах *in vitro*. Результаты показывают уменьшение диаметра мицелия гриба при добавлении НЧ CuO в концентрациях 50-200 мг/л. Причем наиболее эффективной оказалась концентрация 50 мг/л, обработка которой привела к уменьшению диаметра мицелия на 18%.

При разработке препаратов на основе металлических НЧ важным вопросом остается выбор стабилизатора, введение которого в процессе синтеза обеспечивает сохранение структур в наноразмерном диапазоне, а, следовательно, и их основных характеристик, в том числе антимикробных свойств.

Целью настоящего исследования является установление возможности использования НЧ CuO, стабилизированных поверхностно-активными веществами (ПАВ) (Твин 20, Тритон X100 и Полигексаметиленбигуанид (ПГМБ)), в составе питательной среды. Предполагается, что модификация питательной среды будет способствовать снижению уровня контаминирования эксплантов и повышению их морфогенного потенциала.

Материалы и методы

НЧ и суспензии НЧ. Для получения нанопрепаратов использовались НЧ CuO, произведенные компании Sigma-Aldrich, США. Размер частиц, согласно данным производителя, составляет 75 – 100 нм. Анализ морфологии и элементного состава наночастиц проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Merlin (Carl Zeiss, Германия) с энергодисперсионным анализатором «10mm2 SDD Detector - X-Act» на базе НОЦ «Экологии и биотехнологий» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина».

Диспергирование и агрегация НЧ в водных растворах являются важными факторами для их безопасного и эффективного применения в различных приложениях. Говоря про биологическое использование, обязательным требованием является гидрофильность и стабильность НЧ в биологических средах. Для получения стабильных нанопрепаратов были использованы различные стабилизаторы: неионогенные ПАВ - Твин 20 (VWR International Ltd, США) и Тритон X100 (Sigma-Aldrich, США), а также катионный ПАВ - ПГМБ (20% раствор, Arch Chemicals, Inc., США), который обычно используют в качестве биоцидного дезинфектанта. Данные виды ПАВ широко применяются в пищевой, фармацевтической промышленности и биохимических исследованиях благодаря своим эмульгирующим и мицеллообразующим свойствам и характеризуются низкой токсичностью и быстрой биodeградацией в окружающей среде. Они практически не диссоциируют в воде на ионы, что снижает их раздражающее действие.

В ходе работы готовили концентрированные препараты НЧ, содержащие 0,1; 1 и 5 мг CuO в 10 мл 0,005 % раствора стабилизатора (Рис. 1), а также растворы без стабилизатора, которые впоследствии вносили в состав питательной среды Мурасиге-Скуга (МС) [25], заменяя 10 мл воды в прописи на 10 мл препарата.

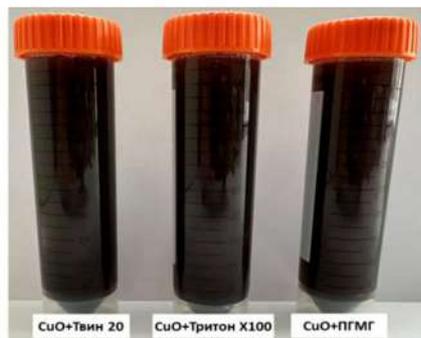


Рисунок 1. Образцы нанопрепаратов
Figure 1. Samples of nanosuspensions

Таким образом, конечные концентрации НЧ в питательной среде составляли 0,1, 1 и 5 мг/л. Анализ стабильности полученных препаратов проводили путем измерения дзета-потенциала на приборе ZetasizerNanoZS (Malvern, Великобритания).

Клональное микроразмножение. Исследования выполняли в лаборатории анализа ПЦР НИИ ИТЛК «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова». Сбор материала для введения в культуру *in vitro* проводили из природных популяций изучаемых объектов в Воронежской области. В качестве эксплантов использовали неодревесневшие сегменты гибрида Т. белый × осина и березы пушистой 15-1 текущего года, 1,5–2,0 см длиной с 2–3 междоузлиями, срезанные с верхней части ветвей. Экспланты отбирали с середины июня до середины августа. Побеги промывали проточной водой с ПАВ и разрезали на сегменты 3-5 см, после чего и стерилизовали в течение 35 минут в растворе, состоящем из 200 мл дистиллированной воды и 200 мкл 5%-го раствора гипохлорита натрия (средства «Белизна», Россия) с последующей однократной промывкой в дистиллированной воде. Основную стерилизацию побегов проводили в ламинар-боксе в растворе, включающем 15 мл 5%-го раствора гипохлорита натрия и 85 мл стерильной дистиллированной воды в течение 15 мин. Промывку проводили также стерильной водой. Стерильные побеги разрезали в асептических условиях на сегменты величиной 1,5-2,0 см с одной пазушной почкой – экспланты, которые впоследствии были высажены на агаризованную питательную среду с добавлением препаратов НЧ CuO. Каждый эксплант

помещали в отдельную пробирку. В качестве контрольных использовали классический вариант питательной среды МС без дополнительных нутриентов, а также питательную среду с НЧ CuO без стабилизаторов. Для анализа возможного влияния ПАВ на микропобеги гибрида Т. белый × осина и березы пушистой 15-1 отдельно тестировали растворы Твин 20, Тритон X100 и ПГМБ, заменяя 10 мл воды в питательной среде на 10 мл 0,005 % раствора стабилизатора.

Пробирки с эксплантами помещали на стеллажи, где поддерживали следующие условия климатического режима: 16-ти часовой фотопериод при освещенности 2-3 клк, температура 24-26°C. На протяжении 3 недель фиксировали число инфицированных эксплантов, стерильных эксплантов, сформировавших основной побег (асептических жизнеспособных) и стерильных нежизнеспособных (асептически нежизнеспособных). Исследования проводили в 3-х кратной повторности, в каждом варианте опыта брали по 30 эксплантов (10 эксплантов × 3 повтора). Статистическую обработку полученных экспериментальных данных осуществляли с помощью определения средней арифметической (М) и ошибки репрезентативности (m) с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2010. Результаты считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Характеризация НЧ и их растворов. Электронно-микроскопическое исследование показало, что порошок CuO состоит из агрегатов палочковидных структур размером 12×70 нм. Как видно из рисунка 2, в состав образца входит только медь и кислород, т.е. отсутствуют какие-либо примеси.

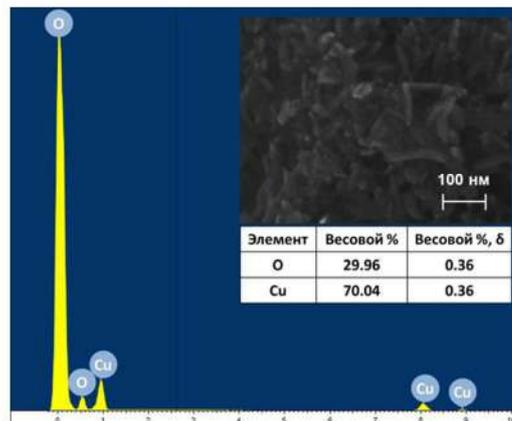


Рисунок 2. СЭМ изображение и элементный состав образца CuO

Figure 2. SEM image and elemental composition of the CuO sample

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: Own experimental data

Анализ стабильности дисперсных систем НЧ показал, что все полученные дисперсии наночастиц обладали достаточно высокой стабильностью (Рис 3).

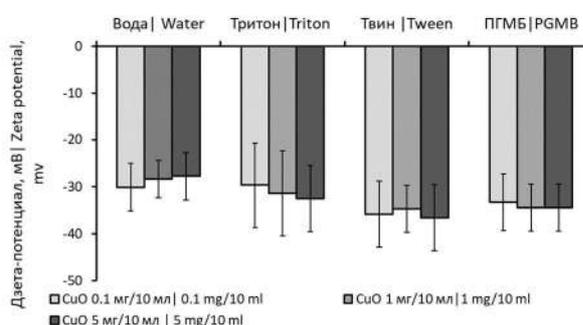


Рисунок 3. Дзета-потенциал препаратов CuO

Figure 3. Zeta potential of CuO preparation

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: Own experimental data

Как видно из рисунка 3, показатель дзета-потенциала для всех дисперсий с ПАВ составил более 30 мВ, что свидетельствует о стабильности полученных растворов. Значение дзета-потенциала равное 30 мВ (по модулю) принято рассматривать как характерное значение, для условного разделения низко-заряженных поверхностей и высоко-заряженных поверхностей [26, 27]. Максимальные показатели отмечены в вариантах с Твин 20 (средние значения около -35 мВ) и ПГМБ (средние значения

около -33 мВ). В водных коллоидных системах значения дзета-потенциала немного снижались с повышением концентрации НЧ – с -30 до -28 мВ.

Клональное микроразмножение растений. Стадия введения в культуру *in vitro* – первый этап клонального микроразмножения, начинающийся с отбора растительного материала и завершающийся получением стерильной культуры в состоянии активного роста. Небольшой размер экспланта, применяемого для клонального микроразмножения, его поверхностная стерилизация, асептический перенос на питательную среду и субкультивирование в условиях, исключающих инфицирование, приводят к оздоровлению полученных растений от нематод, грибных и бактериальных патогенов. На данном этапе необходимо получить стерильную культуру с высокой регенерационной способностью. Успех проведения данного этапа определяется правильностью подбора стерилизующего агента и среды для проведения процесса регенерации, а также сроков введения. Исследованиями предыдущих лет было установлено оптимальное время введения в культуру тканей древесных пород растений – июнь-июль, когда активность ростовых процессов максимальна [28]. Одной из трудностей работы со взрослыми растениями лесных древесных растений является сильная обсемененность тканей и органов культуральных эксплантов. Результаты показали, что исходный материал древесных растений имел низкий процент зараженности бактериальной инфекцией, больше грибной. В этой связи описанный в литературных источниках [8] прием подавления посторонней микрофлоры с использованием антибиотиков, вносимых в состав питательной среды, оказался малоэффективным при получении стерильных эксплантов.

В таблице 1 представлены результаты этапа введения в культуру *in vitro* гибрида Т. белый ×

осина. Снижение числа инфицированных эксплантов при использовании дисперсий НЧ CuO позволило установить их антимикробное действие. Наибольшим действием в подавлении микрофлоры обладали НЧ без стабилизаторов (варианты 2, 3, 4). Вероятно, это связано с созданием защитного органического покрытия стабилизатора, которое экранирует неорганическое ядро НЧ CuO от контакта с водной средой и микроорганизмами, что снижает их антагонистическую активность. Данный факт описан в ряде литературных источниках [11, 29]. Средние значения по показателю инфицированности эксплантов без стабилизатора составляли 32,2%; при использовании НЧ, стабилизированных Тритон X100, Твин 20 и ПГМБ – 40,0%. Однако, главной проблемой при использовании препаратов НЧ является их хранение: НЧ благодаря большой поверхности способны к быстрой агломерации наноструктур и утрате наноразмерных характеристик, что диктует необходимость использования их сочетания со стабилизаторами.

Как показали результаты исследований, применение стабилизаторов хотя и повышало число инфицированных эксплантов (26,7-53,3), однако все равно этот показатель был ниже контрольного варианта без НЧ (вариант 1) (60,0%). Установлено снижение показателя инфицированности эксплантов при возрастании концентрации наночастиц в среде МС от 0,1-5 мг/л. Минимальный выход инфицированных культур наблюдался в варианте без стабилизаторов – 13,3 % (вариант 4) при 5 мг/л CuO. В случае использования НЧ CuO с Тритон X100 (вариант 7) и ПГМБ (вариант 15) число инфицированных эксплантов при максимальной концентрации CuO составляло 26,7%. Использование Твин 20 в качестве стабилизатора позволяло снизить инфицированность до 33,3 (вариант 11).

Влияние НЧ CuO на процесс введения гибрида Т. белый х осина в культуру *in vitro*

Table 1

The influence of NPs CuO on the process of introducing the poplar × aspen hybrid into culture *in vitro*

Стабилизатор Stabilizer	Номер варианта Variant number	Концентрация НЧ, мг/л Concentration NP, mg/l	Число культур, % Number of culture, %		
			Инфицированные Infected	Асептических нежизнеспособные Aseptically unviable	Асептических жизнеспособные Aseptically viable
Контроль Control	1	0	60,0±5,8	0	40,0±5,8
Без стабилизатора Without stabilizer	2	0,1	46,7±8,8	3,3±3,3	50,0±5,8
	3	1	36,7±3,3	6,7±3,3	56,7±6,7
	4	5	13,3±3,3	10,0	76,7±3,3
Тритон X 100 Triton X100	5	0,1	53,3±6,7	0	46,7±6,7
	6	1	40,0±5,8	6,6±3,3	53,3±5,8
	7	5	26,7±6,7	16,7±6,7	56,7±3,3
	8	0	56,7±3,3	0	43,3±3,3
Твин 20 Tween 20	9	0,1	46,7±3,3	3,3±3,3	50,0±5,8
	10	1	40,0±5,8	6,7±3,3	53,3±3,3
	11	5	33,3±6,7	6,7±3,3	60,0±5,8
	12	0	53,3±3,3	0	46,7±3,3
ПГМБ PGMB	13	0,1	50,0±5,8	3,3±3,3	46,7±3,3
	14	1	43,3±3,3	3,3±3,3	53,3±3,3
	15	5	26,7±6,7	6,7±3,3	66,7±3,3
	16	0	56,7±8,8	0	43,3±8,8

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: Own experimental data

При исследовании действия на клетки стабилизированных растворов НЧ необходимо ставить контрольный опыт на собственную токсичность водного раствора этих стабилизаторов, поскольку стабилизаторы сами могут обладать антимикробной активностью. Результаты проведенных нами исследований показали, что стабилизаторы не оказывали достоверного противомикробного влияния в анализируемых концентрациях (вариант 8, 12, 16). Число инфицированных культур при добавлении стабилизаторов в состав питательных сред составляло 53,3-56,7%, в контроле данный показатель составлял 60,0%.

При введении в культуру *in vitro* необходимо учитывать и токсическое действие НЧ, которое проявляется не только в угнетении роста и развития представителей эпифитной микрофлоры, но и в снижении жизнеспособности растений, о чем имеется большое количество экспериментальных статей [12, 16, 26]. В ходе проведения исследований установлено повышение показателя нежизнеспособных культур при возрастании концентрации НЧ в среде. Сравнивая средние значения исследуемого параметра для различных вариантов применения НЧ отмечено снижение их токсического действия при использовании НЧ CuO в комбинации со стабилизаторами. Так, средний показатель нежизнеспособных эксплантов на среде с НЧ без стабилизатора составлял 6,7%. (в контроле 0). НЧ CuO, стабилизированные Твин 20 и ПГМБ, обладали меньшим токсическим действием – средний показатель нежизнеспособных культур составлял 5,6 и 4,4%, соответственно. Использование Тритон X100 в качестве стабилизатора не оказало подобного эффекта.

Интегральным показателем проведения стадии введения является число асептических жизнеспособных эксплантов. Этот параметр показывает какое количество из стерильных эксплантов сформировали основной побег. Применение НЧ CuO (5 мг/л) без стабилизаторов (вариант 4) повышало анализируемый показатель на 36,7% по сравнению с контролем (вариант 1). Модификация среды МС путем внесения стабилизированных НЧ CuO (варианты 7, 11, 15), позволило повысить на 16,7 – 26,6% число асептических жизнеспособных эксплантов. В

вариантах со стабилизаторами наибольшее количество стерильных жизнеспособных эксплантов – 66,7%, пригодных для дальнейшего прохождения стадий микроразмножения, получено на среде МС, дополненной НЧ CuO с ПГМБ (вариант 15).

При исследовании процесса введения в культуру *in vitro* березы пушистой 15-1 отмечен более высокий уровень инфицированности эксплантов в контрольном варианте 1 (70,0%) по сравнению с аналогичным показателем у тополя (60,0%) (Таблица 1, 2). Данный факт может быть связан с анатомическими особенностями растений. У березы пушистой (*Betula pubescens*) поверхность побегов имеет опушение, которое создает механические препятствия для равномерного нанесения стерилизующих растворов. Кроме того, опушение служит резервуаром для микроорганизмов – ворсинки удерживают споры грибов и бактерии, увеличивая риск повторного заражения после обработки. У гибридных форм тополя (например, Т. белый х осина) поверхность побегов более гладкая, что облегчает контакт стерилизующих агентов с поверхностью эксплантов и снижает вероятность сохранения патогенов в микроскладках и порах [5, 6]. На модифицированных средах с НЧ CuO также как и в случае с эксплантами гибрида тополя отмечено уменьшение числа инфицированных культур при возрастании концентрации НЧ. Так, в контрольном варианте их количество составляло 70,0% (вариант 1), внесение растворов НЧ без стабилизаторов снижало данный показатель до 23,3-43,3% (варианты 2, 3, 4), в зависимости от концентрации НЧ. Использование стабилизированных НЧ позволяло снизить показатель инфицированности до 30,0 – 56,7%. Среднее значение данного параметра у нестабилизированных НЧ CuO составляло 35,5%, у НЧ, стабилизированных Тритон X100, Твин 20 и ПГМБ, – 38,8, 43,3 и 40,0%, соответственно. О проявлении токсического действия НЧ, введенных в среду для культивирования березы пушистой 15-1, можно судить по числу асептических нежизнеспособных эксплантов. Для НЧ, стабилизированных ПГМБ установлено наименьшее значение асептических нежизнеспособных культур – 3,3% при максимальной концентрации НЧ 5 мг/л (вариант 15). Наиболее угнетающим действием на экспланты березы оказывали НЧ без стабилизаторов (вариант

Естественные науки и лес

5) и НЧ, стабилизированные Тритоном X100 – число асептических нежизнеспособных культур составляет 10,0% (вариант 7). Максимальные значения числа асептических жизнеспособных эксплантов березы - 66,7%, получено с использованием НЧ в концентрации 5 мг/л без стабилизаторов, а также с НЧ,

стабилизированными ПГМБ (в контроле 30,0%). Для НЧ, стабилизированных Твин 20 и Тритон X100 при той же концентрации НЧ число эксплантов, пригодных для прохождения дальнейших стадий микроразмножения, составляет 60%

. Таблица 2

Влияние НЧ CuO на процесс введения в культуру *in vitro* березы пушистой 15-1

Table 2

The influence of NPs CuO on the process of introduction into *in vitro* culture of downy birch 15-1

Стабилизатор Stabilizer	Номер варианта Variant number	Концентрация НЧ, мг/л Concentration NP, mg/l	Число культур, %		
			Инфицированные Infected	Асептических нежизнеспособные Aseptically unviable	Асептических жизнеспособные Aseptically viable
Контроль Control	1	0	70,0±5,8	0	30,0±5,8
Без стабилизатора Without stabilizer	2	0,1	43,3±6,7	6,7±3,3	53,3±3,3
	3	1	40,0±5,8	6,7±3,3	60,0±5,8
	4	5	23,3±6,7	10,0	66,7±6,7
Тритон X100 Triton X100	5	0,1	53,3±3,3	0	46,7±3,3
	6	1	33,3±3,3	10,0	56,7±3,3
	7	5	30,0±5,8	10,0±5,8	60,0
	8	0	63,3±3,3	0	36,7±3,3
Твин 20 Tween 20	9	0,1	56,7±8,8	3,3±3,3	40,0±10,0
	10	1	40,0±5,8	6,7±3,3	53,3±8,8
	11	5	33,3±6,7	6,7±3,3	60,0±5,8
	12	0	63,3±3,3	0	33,3±3,3
ПГМБ PGMB	13	0,1	46,7±6,7	0	53,3±6,7
	14	1	43,3±6,7	0	56,7±6,7
	15	5	30,0±5,8	3,3±3,3	66,7±6,7
	16	0	70,0±5,8	0	30,0±5,8

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: Own experimental data

Заключение

1. Растворы НЧ оксида меди, стабилизированные ПАВ (Твин 20, Тритон X100 и ПГМБ), можно рассматривать в качестве перспективных антимикробных агентов для снижения уровня инфицированности эксплантов древесных растений на этапе введения в культуру *in vitro*.

2. В ходе работы были опробированы концентрированные препараты НЧ, содержащие 0,1; 1 и 5 мг CuO в 10 мл 0,005 % раствора стабилизатора.

Анализ стабильности дисперсных систем НЧ показал, что все полученные дисперсии наночастиц обладали достаточно высокой стабильностью – показатель дзета-потенциала для всех дисперсий с ПАВ составил более 30 мВ.

3. При сравнении средних показателей инфицированности эксплантов тополя Т. белый × осина и березы 15-1 на средах с НЧ установлено, что наибольшим антисептическим действием обладают НЧ без стабилизаторов. Вероятно, это связано со

стерическими препятствиями, которые создаются стабилизаторами вокруг каждой НЧ, что снижает их антагонистическую активность в отношении представителей эпифитной микрофлоры. Средние значения по показателю инфицированности эксплантов тополя без стабилизатора составляли 32,2%; при использовании НЧ, стабилизированных, Тритон X100, Твин 20 и ПГМБ – 40,0% (в контроле 60,0%). Для березы исследуемый показатель составлял в контрольном варианте 70,0%, в варианте опыта с нестабилизированными НЧ – 35,5%, при использовании стабилизаторов Тритон X100, Твин 20, ПГМБ – 38,9; 43,3; 40,0%, соответственно. Более высокие показатели инфицированности эксплантов березы по сравнению с эксплантами гибрида тополя в контрольном варианте связаны, по-видимому, с анатомическими особенностями растений – опушенные побеги березы затрудняют проведение процесса стерилизации.

4. Определена оптимальная концентрация НЧ – 5 мг/л, использование которой позволяет повысить выход стерильных жизнеспособных эксплантов тополя на 16,7-26,7%, березы 30-36,7%. Наибольшим

антагонистическим действием в отношении поверхностной (эпифитной) микрофлоры среди стабилизированных НЧ обладают НЧ CuO с ПГМБ – выход асептических жизнеспособных эксплантов тополя и березы составляет 66,7%.

5. Наиболее угнетающим действием на экспланты оказывали НЧ CuO без стабилизаторов и НЧ, стабилизированные Тритон X100. Число асептических нежизнеспособных культур при максимальной концентрации НЧ 5 мг/л составляет 10,0 и 16,7 % у тополя, 10,0 и 10,0% у березы, соответственно. Менее токсичное действие оказывают НЧ, стабилизированные ПГМБ – среднее число асептических нежизнеспособных эксплантов тополя и березы составляет 1,1 и 4,4% соответственно. Различные значения показателя у эксплантов тополя и березы, вероятно, связаны с особенностями их анатомического строения и иммунного ответа системы растений.

Таким образом, в ходе проведения исследований была доказана целесообразность использования на стадии введения в культуру тканей в составе питательных сред нанопрепаратов CuO, стабилизированными ПАВ (Тритон X100, Твин 20, ПГМБ).

Список литературы

1. Самарская В.О., Малаева Е.В., Постнова М.В. Аспекты клонального микроразмножения и сохранения растений *in vitro*. Природные системы и ресурсы. – 2019. – №9(3). – С. 13-22. – DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2019.3.2>.
2. Бутенко Р.Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнология на их основе. – Москва: МГУ, 1999. –160 с.
3. Jones O.P., Welander M., Waller B.J., Ridout M.S. Micropropagation of adult birch trees: production and field performance. *Tree Physiol.* 1996; 16(5): 521-525. – DOI:10.1093/treephys/16.5.521.
4. Зонтиков Д.Н., Марамохин Э.В. Проблемы стерильности сред и растительных эксплантов культуры *in vitro* лаборатории клонального микроразмножения растений. Молодой ученый. – 2014. – №8. – С. 317-320. – URL: <https://m.eruditor.one/file/1485858/>
5. Ветчинникова Л.В. Клональное микроразмножение редких представителей рода *Betula* L. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. –51 с. URI: <http://elibrary.krc.karelia.ru/id/eprint/818>.
6. Шабанова Е.А., Машкина О.С. Клональное микроразмножение хозяйственно-ценных форм тополя. Лесохозяйственная информация. – 2015. – №4. – С. 74-81. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24957211&ysclid=m6t0ztj0a7226659632>.
7. Бунцевич Л.Л., Палецкая Е.Н., Костюк М.А., Медведева Н.И. Исследование эффективности антибиотиков и стерилизаторов нового поколения для подавления бактериальной и грибной контаминации среды и эксплантов. Плодоводство и виноградарство юга России. – 2012. – №16. – С. 44-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17843925&ysclid=m6t155n3qw755448990>.

8. Митрофанова И.В. Соматический эмбриогенез и органогенез как основа биотехнологии получения и сохранения многолетних садовых культур. – Киев: Аграрная наука, 2011. – 344с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28943713&ysclid=m6t1q3n48z463306112>.
9. Патент №255387 Российская Федерация, МПК А01Н 4/00. (2006.01). Способ клонального микроразмножения и оздоровления подвоев яблони *in vitro* с использованием антибиотика Гризеофульвин: № 2014124424/10: заявл. 16. 06. 2014: опубл. 20. 07. 2015 / Бунцевич Л.Л., Беседина Е.Н., Костюк М.А., Макаркина М.В.; заявитель ФГБНУ Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, ООО «Здоровый сад», ООО «Демерта». – 4с.
10. Abboud M.A novel biological approach to copper nanoparticles synthesis: characterization and its application against phytopathogenic fungi. Research square. 2020; 15. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-125001/v1.
11. Pařil P., Baar J., Āermák P., Rademacher P., Pucek R., Sivera M., Panáček A. Antifungal effects of copper and silver nanoparticles against white and brown-rot fungi. J. Mater. Sci. 2017; 52: 2720–2729. DOI: 10.1007/s10853-016-0565-5.
12. Al-Khayri J.M., Alnaddaf L.M., Jain S.M. Nanomaterial interactions with plant cellular mechanisms and macromolecules and agricultural implications. Springer Nature Switzerland AG, 2023; 507.
13. Hayat S., Pichtel J., Faizan M., Fariduddin Q. Sustainable Agriculture Reviews 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development. Springer Nature Switzerland AG. 2020; 216. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33996-8>.
14. Tung H.T., Bao H.G., Buu N.Q., Chau N.H., Nhut D.T. The use of silver nanoparticles as a disinfectant and media additive in plant micropropagation. Plant Tissue Culture: New Techniques and Application in Horticultural Species of Tropical Region. Springer: Singapore. 2022; 287-302. – DOI: 10.1007/978-981-16-6498-4_14.
15. Aleksandrowicz-Trzcinska M, Szaniawski A, Studnicki M, Bederska-Blaszczyk M, Olchowik J, Urban A. The effect of silver and copper nanoparticles on the growth and mycorrhizal colonisation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in a container nursery experiment. iForest. 2018; 11: 690-697. DOI: 10.3832/ifer2855-01.
16. Chibber S, Ansari SA, Satar R. New vision to CuO, ZnO, and TiO2 nanoparticles: their outcome and effects. J. Nanopart. Res. 2013; 15: 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1492-x>.
17. Gaba, S., Varma, A. & Goel, A. Protective and curative activity of biogenic copper oxide nanoparticles against *Alternaria* blight disease in oilseed crops: a review. J Plant Dis Prot 129. 2022; 215–229. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00555-7>.
18. Anderson A.J., McLean J.E., Jacobson A.R., Britt D.W. CuO and ZnO nanoparticles modify interkingdom cell signaling processes relevant to crop production. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2018; 66 (26): 6513-6524. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b01302.
19. Elmer W., Ma C., White J. Nanoparticles for plant disease management. Current Opinion in Environmental Science & Health. 2018; 6: 66–70. – DOI: 10.1016/j.coesh.2018.08.002.
20. Cuong H.N., Pansambal S., Ghotekar S., Oza R., Hai N.T.T., Viet N.M., Nguyen V.-H. New frontiers in the plant extract mediated biosynthesis of copper oxide (CuO) nanoparticles and their potential applications: A review. Environmental Research. 2022; 203. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111858.
21. Kamel S.M., Elgobashy S.F., Omara R.I., Derbalah A.S., Abdelfatah M., El-Shaer A., Al-Askar A.A., Abdelkhalek A., Abd-Elsalam K.A., Essa T., et al. Antifungal Activity of Copper Oxide Nanoparticles against Root Rot Disease in Cucumber. J. Fungi. 2022; 8(9): 911. – DOI:10.3390/jof8090911.
22. Hermida-Montero L.A., Pariona N., Mtz-Enriquez A.I., Carrión G., Paraguay-Delgado F., Rosas-Saito G. Aqueous-phase synthesis of nanoparticles of copper/copper oxides and their antifungal effect against *Fusarium oxysporum*. J Hazard Mater. 2019; 380. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120850.
23. Pariona N., Cereceda S.B., Mondaca F., Carrión G., Mtz-Enriquez A.I. Antifungal activity and degradation of methylene blue by ZnO, Cu, and Cu₂O/Cu nanoparticles, a comparative study // Mater. Lett. 2021; 301: 130182 DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130182.

24. Hao Y., Cao X., Ma C., Zhang Z., Zhao N., Ali A., Hou T., Xiang Z., Zhuang J., Wu S., Xing B., Zhao Z., Rui Y. Potential applications and antifungal activities of engineered nanomaterials against gray mold disease agent *Botrytis cinerea* on rose petals. *Front. Plant Sci.* 2017; 8: 1332. DOI: 10.3389/fpls.2017.01332.
25. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bioassays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum.* 1962; 15: 473 – 497. DOI:10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
26. Liu J., Tu, L., Cheng M., Feng, J., Jin Y. Mechanisms for oral absorption enhancement of drugs by nanocrystals. *Journal of Drug Delivery Science and Technology.* 2020; 56: 101607. DOI:10.1016/j.jddst.2020.101607.
27. Krstić M., Medarević, Đ., Đuriš J., Ibrić S. *Lipid Nanocarriers for Drug Targeting* / William Andrew Publishing, Norwich NY. 2018; 12: 473-508.
28. Федорова О.А., Евлаков П.М., Гродецкая Т.А. Клональное микроразмножение гибридов тополя, перспективных для выращивания в воронежской области. *Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация.* 2023. – №4. – С. 48-54. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?ysclid=m6t720r6oz578521598&id=55925561>.
29. Шульгина Т.А., Нечаева О.В., Глинская Е.В., Дарьин Н.И., Торгашова А.С., Теслюк Д.А., Бабайлова А. В., Панфилова Е.А. Антимикотическая активность наночастиц серебра в зависимости от используемого стабилизатора. *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология.* -2017. – Т. 17 (4). – С. 465–468. DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-4-465-468

References

1. Samarskaya V.O., Malaeva E.V., Postnova M.V. *Aspekty klonalnoy mikrorazmnozheniya i soxraneniya rastenij in vitro*. [Aspects of clonal micropropagation and plant conservation in vitro]. *Prirodnye sistemy i resursy = Natural systems and resources.* 2019; 9(3): 13-22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2019.3.2>.
2. Butenko R.G. *Biologiya kletok vysshix rastenij in vitro i biotekhnologiya na ix osnove* [Biology of higher plant cells in vitro and biotechnology based on them]. Moskva: MGU = Moscow: MSU. 1999. 160. (In Russ.).
3. Jones O.P., Welander M., Waller B.J., Ridout M.S. *Micropropagation of adult birch trees: production and field performance.* *Tree Physiol.* 1996; 16(5): 521-525. DOI:10.1093/treephys/16.5.521. URL: <https://doi.org/10.1093/treephys/16.5.521>.
4. Zontikov, D.N., Maramoxin E.V. *Problemy`sterilnosti sred i rastitelnyx eksplantov kultury in vitro laboratorii klonalnoy mikrorazmnozheniya rastenij*. [Problems of sterility of media and plant explants of in vitro culture of the laboratory of clonal micropropagation of plants]. *Molodoj uchenyj = Young scientist.* 2014; 8: 317-320. (In Russ.).–URL: <https://m.eruditor.one/file/1485858/>
5. Vetchinnikova L.V. *Klonalnoe mikrorazmnozhenie redkix predstavitelej roda Betula L.* [Clonal micropropagation of rare representatives of the genus *Betula L.*]. Petrozavodsk: KarNC RAN = Petrozavodsk KarSC of RAS. 2022. 51 c. (In Russ.). – URI: <http://elibrary.krc.karelia.ru/id/eprint/818>.
6. Shabanova E.A., Mashkina O.S. *Klonalnoe mikrorazmnozhenie xozyajstvenno-cennyx form topolya.* [Clonal micropropagation of economically valuable forms of poplar]. *Lesoxozyajstvennaya informaciya = Forestry information.* 2015; (4): 74-81. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24957211&ysclid=m6t0ztj0a7226659632>.
7. Buncevic L.L., Paleczkaya E.N., Kostyuk M.A., Medvedeva N.I. *Issledovanie effektivnosti antibiotikov i sterilizatorov novogo pokoleniya dlya podavleniya bakterialnoj i gribnoj kontaminacii sredy i eksplantov.* [Study of the effectiveness of new generation antibiotics and sterilizers for suppressing bacterial and fungal contamination of the environment and explants]. *Plodovodstvo i vinogradarstvo yuga Rossii = Fruit growing and viticulture in the south of Russia.* 2012; 16: 44-53. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17843925&ysclid=m6t155n3qw755448990>.
8. Mitrofanova I.V. *Somaticeskij embriogenez i organogenez kak osnova biotekhnologii polucheniya i soxraneniya mnogoletnix sadovyx kultur.* [Somatic embryogenesis and organogenesis as a basis for biotechnology of obtaining and preserving perennial garden crops]. *Agrarnaya nauka = Agrarian science.* 2011;344. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28943713&ysclid=m6t1q3n48z463306112>.
9. Patent №255387 Russian Federation, МРК А01Н 4/00. (2006.01). *Sposob klonalnogo mikrorazmnozheniya i ozdorovleniya podvoev yabloni in vitro s ispol'zovaniem antibiotika grizeofulvin.* [Method of clonal micropropagation

and healthier of apple rootstocks in vitro using the antibiotic griseofulvin]: 2014124424/10: declared 16. 06. 2014: published 20. 07. 2015 / Buncevich L.L., Besedina E.N., Kostyuk M.A., Makarkina M.V.; The applicant FSBSI North Caucasus Zonal Research Institute of Horticulture and Viticulture, LLC “Healthy Garden”, LLC “Demerta”: 4. (In Russ.).

10. Abboud M. *A novel biological approach to copper nanoparticles synthesis: characterization and its application against phytopathogenic fungi*. Research square. 2020; 15. DOI: 10.21203/rs.3.rs-125001/v1.

11. Pařil P., Baar J., Āermák P., Rademacher P., Prucek R., Sivera M., Panáček A. *Antifungal effects of copper and silver nanoparticles against white and brown-rot fungi*. J. Mater. Sci. 2017; 52: 2720–2729. DOI: 10.1007/s10853-016-0565-5.

12. Al-Khayri J.M., Alnaddaf L.M., Jain S.M. *Nanomaterial interactions with plant cellular mechanisms and macromolecules and agricultural implications*. Springer Nature Switzerland AG. 2023; 507.

13. Hayat S., Pichtel J., Faizan M., Fariduddin Q. *Sustainable Agriculture Reviews 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development*. Springer Nature Switzerland AG. 2020; 216. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33996-8>.

14. Tung H.T., Bao H.G., Buu N.Q., Chau N.H., Nhut D.T. *The use of silver nanoparticles as a disinfectant and media additive in plant micropropagation*. Plant Tissue Culture: New Techniques and Application in Horticultural Species of Tropical Region. Springer: Singapore. 2022; 287-302. –DOI: 10.1007/978-981-16-6498-4_14.

15. Aleksandrowicz-Trzcinska M, Szaniawski A, Studnicki M, Bederska-Blaszczyk M, Olchowik J, Urban A. *The effect of silver and copper nanoparticles on the growth and mycorrhizal colonisation of Scots pine (Pinus sylvestris L.) in a container nursery experiment*. iForest. 2018; 11: 690-697. DOI: 10.3832/ifer2855-01.

16. Chibber S, Ansari SA, Satar R. *New vision to CuO, ZnO, and TiO2 nanoparticles: their outcome and effects*. J. Nanopart. Res. 2013; 15: 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1492-x>.

17. Gaba, S., Varma, A. & Goel, A. *Protective and curative activity of biogenic copper oxide nanoparticles against Alternaria blight disease in oilseed crops: a review*. J Plant Dis Prot 129. 2022; 215–229. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00555-7>.

18. Anderson A.J., McLean J.E., Jacobson A.R., Britt D.W. *CuO and ZnO nanoparticles modify interkingdom cell signaling processes relevant to crop production*. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2018; 66 (26): 6513-6524. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b01302.

19. Elmer W., Ma C., White J. *Nanoparticles for plant disease management*. Current Opinion in Environmental Science & Health. 2018; 6: 66–70. – DOI: 10.1016/j.coesh.2018.08.002.

20. Cuong H.N., Pansambal S., Ghotekar S., Oza R., Hai N.T.T., Viet N.M., Nguyen V.-H. *New frontiers in the plant extract mediated biosynthesis of copper oxide (CuO) nanoparticles and their potential applications: A review*. Environmental Research. 2022; 203. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111858.

21. Kamel S.M., Elgobashy S.F., Omara R.I., Derbalah A.S., Abdelfatah M., El-Shaer A., Al-Askar A.A., Abdelkhalek A., Abd-Elsalam K.A., Essa T., et al. *Antifungal Activity of Copper Oxide Nanoparticles against Root Rot Disease in Cucumber*. J. Fungi. 2022; 8(9):911. – DOI:10.3390/jof8090911.

22. Hermida-Montero L.A., Pariona N., Mtz-Enriquez A.I., Carrión G., Paraguay-Delgado F., Rosas-Saito G. *Aqueous-phase synthesis of nanoparticles of copper/copper oxides and their antifungal effect against Fusarium oxysporum*. J Hazard Mater. 2019; 380. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120850.

23. Pariona N., Cereceda S.B., Mondaca F., Carrión G., Mtz-Enriquez A.I. *Antifungal activity and degradation of methylene blue by ZnO, Cu, and Cu2O/Cu nanoparticles, a comparative study*. Mater. Lett. 2021; 301: 130182 DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130182.

24. Hao Y., Cao X., Ma C., Zhang Z., Zhao N., Ali A., Hou T., Xiang Z., Zhuang J., Wu S., Xing B., Zhao Z., Rui Y. *Potential applications and antifungal activities of engineered nanomaterials against gray mold disease agent Botrytis cinerea on rose petals*. Front. Plant Sci. 2017; 8: 1332. DOI: 10.3389/fpls.2017.01332.

25. Murashige T., Skoog F. *A Revised Medium for Rapid Growth and Bioassays with Tobacco Tissue Cultures*. Physiologia Plantarum. 1962; 15: 473 – 497. DOI:10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.

26. Liu, J., Tu, L., Cheng, M., Feng, J., Jin, Y. *Mechanisms for oral absorption enhancement of drugs by nano-crystals*. Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2020; 56: 101607. DOI:10.1016/j.jddst.2020.101607.

27. Krstić, M., Medarević, Đ., Đuriš, J., Ibrić, S. *Lipid Nanocarriers for Drug Targeting* / William Andrew Publishing, Norwich NY. 2018; 12: 473-508.

28. Fedorova O.A., Evlakov P.M., Grodeczkaya T.A. *Klonalnoe mikrorazmnozhenie gibridov topolya, perspektivnyx dlya vyrashhivaniya v voronezhskoj oblasti*. [Clonal micropropagation of poplar hybrids promising for cultivation in the Voronezh region.]. Vestnik VGU. Seriya: Ximiya. Biologiya. Farmaciya.= VSU Bulletin. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. 2023; 4: 48-54. (In Russ.). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?ysclid=m6t720r6oz578521598&id=55925561>.

29. Shulgina T.A., Nechaeva O.V., Glinskaya E.V., Daryin N.I., Torgashova A S., Teslyuk D A., Babailova A. V., Panfilova E.A. *Antimikoticheskaya aktivnost nanochasticz serebra v zavisimosti ot ispolzuemogo stabilizatora* [Antifungal activity of silver nanoparticles depending on the stabilizer used]. Izv. Saratov Univ. (N.S.), Seriya: Ximiya. Biologiya. Ekologiya = SU Bulletin. (N. S.) Series: Chemistry. Biology. Ecology. 2017; 17(4): 465–468 (In Russ.). DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-4-465-468

Сведения об авторах

✉ *Федорова Ольга Анатольевна* — кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: fed-olga78@mail.ru.

Евтушенко Надежда Александровна — кандидат биол. наук, младший научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0099-6779>, e-mail: nadya.evtushenko.94@mail.ru.

Евлаков Петр Михайлович — кандидат биол. наук, заведующий лабораторией анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru.

Захарова Ольга Владимировна — кандидат биол. наук, директор НОЦ «Экологии и биотехнологий» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Защитный переулок, 7, г. Тамбов, Российская Федерация 392020, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8590-2529>, e-mail: olgazakharova1@mail.ru.

Гусев Александр Анатольевич — доктор биол. наук, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Защитный переулок, 7, г. Тамбов, Российская Федерация 392008, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8699-9112>, e-mail: nanosecurity@mail.ru

Information about the authors

✉ *Olga A. Fedorova* — PhD, Senior Researcher of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: fed-olga78@mail.ru.

Nadejda A. Evtushenko — PhD, Junior Researcher of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0099-6779>, e-mail: nadya.evtushenko.94@mail.ru.

Естественные науки и лес

Peter M. Evlakov – PhD, Head of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: peter.evlakov@yandex.ru.

Olga V. Zakharova — PhD, Head of the Scientific and Educational Center for Environmental Science and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 7, Zashitny str., Tambov, 392020, Russian federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8590-2529>, e-mail: olgazakharoval@mail.ru.

Alexander A. Gusev — Dr. Sci. (Biology), Vice Rector for Science, Derzhavin Tambov State University, 7, Zashitny str., Tambov, 392020, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8699-9112>, e-mail: nanosecurity@mail.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/10>

УДК 630*674.419.32



Структурообразование при низкотемпературном режиме прессования фанеры ФСФ

Татьяна Н. Вахнина, t_vachnina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Александр А. Федотов ✉, aafedotoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Ирина В. Сусоева, i.susoeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, 17/11, г. Кострома, 156005, Российская Федерация

Аннотация

Фанера ФСФ используется в вагоностроении, строительстве, отделке малотоннажных судов и яхт и является эффективным заменителем древесины. Повышение конкурентоспособности фанеры возможно путем снижения расхода связующего или уменьшения температуры прессования. В работе одновременно снижены температура горячего прессования фанеры ФСФ и расхода связующего. В качестве модификатора использована сульфосалициловая кислота (ССК). На ИК-Фурье спектрометре Nicolet iS10 получены ИК-спектры связующего и фанеры. В модифицированном связующем и фанере на его основе уменьшается количество связанной воды и гидроксиметильных групп, увеличивается количество групп CH_2 . На втором этапе выполнено исследование механических свойств фанеры путем реализации эксперимента по В-плану 2-го порядка. Разработаны регрессионные модели прочности фанеры при статическом изгибе и прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 часа. Варьировались факторы: температура прессования (X_1) от 85 до 105 °С, расход смолы (X_2) – от 88 до 98 г/м², доля добавки модификатора (X_3) – от 0 до 1%. Снижение расхода смолы до 88 г/м² и уменьшение температуры прессования фанеры до 85 °С на не модифицированном связующем обеспечивает показатель предела прочности материала при статическом изгибе – 76,4 МПа, при этом максимально снижается адгезионная прочность – 0,05 МПа. Образцы фанеры при испытании на скалывание после кипячения разрушаются при нагрузке 20...24 кгс, скалывание идет по клеевому слою. Фанера, изготовленная на модифицированном связующем при температуре прессования 95 °С, расходе смолы 93 г/м² и расходе ССК 0,5 % от массы смолы имеет показатели: прочность при скалывании по клеевому слою после кипячения – 0,748 МПа, прочность образцов при статическом изгибе – 111,57 МПа.

Ключевые слова: фанера ФСФ, фенолоформальдегидное связующее, модифицирующая добавка, сульфосалициловая кислота, прессование, ИК-спектры.

Финансирование: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 24-29-20157.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Вахнина, Т. Н. Структурообразование при низкотемпературном режиме прессования фанеры ФСФ / Т. Н. Вахнина, А. А. Федотов, И. В. Сусоева // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 158-173. – Библиогр.: с. 170-172 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/10>.

Article

Structure formation during low-temperature pressing of plywood on phenol-formaldehyde binder

Tatiana N. Vakhnina, t_vakhnina@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>

Alexander A. Fedotov , aafedotoff@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>

Irina V. Susoeva, i.susoeva@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>

Kostroma State University, 17/11 Dzerzhinsky str., Kostroma, 156005, Russian Federation

Plywood on phenol-formaldehyde binder is used in carriage building, construction, finishing of small-tonnage vessels and yachts and is an effective substitute for wood. Improving the competitiveness of plywood is possible by reducing the consumption of the binder or decreasing the pressing temperature. In this work, the temperature of hot pressing of plywood FSF and the consumption of the binder were simultaneously reduced. Sulfosalicylic acid was used as a modifier. IR spectra of the binder and plywood were obtained on a Nicolet iS10 IR Fourier spectrometer. In the modified binder and plywood based on it, the amount of bound water and hydroxymethyl groups decreases, the number of CH₂ groups increases. At the second stage, the study of the mechanical properties of plywood was carried out by implementing an experiment according to the 2nd order B-plan. Regression models were developed for the strength of plywood under static bending and the strength when shearing along the adhesive layer after boiling for 1 hour. The following factors were varied: pressing temperature (X₁) from 85 to 105 °C, resin consumption (X₂) from 88 to 98 g/m², modifier additive share (X₃) from 0 to 1 %. Reducing resin consumption to 88 g/m² and decreasing plywood pressing temperature to 85 °C on an unmodified binder provides the material static bending strength limit of 76.4 MPa, while maximally reducing adhesive strength - 0.05 MPa. Plywood samples are destroyed under a load of 20...24 kgf when tested for chipping after boiling, chipping occurs along the adhesive layer. Plywood made with a modified binder at a pressing temperature of 95 °C, a resin consumption of 93 g/m² of resin surface and a sulfosalicylic acid consumption of 0.5% of the resin weight has the following indicators: shear strength along the adhesive layer after boiling - 0.748 MPa, strength of samples under static bending - 111.57 MPa.

Keywords: plywood, phenol-formaldehyde binder, modifying additive, sulfosalicylic acid, pressing, IR spectra.

Funding: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the administration of the Kostroma Region within the framework of scientific project No. 24-29-20157.

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

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

For citation: Vakhnina T. N., Fedotov A. A., Susoeva I. V. (2025). Structure formation in the low-temperature mode of pressing FSF plywood on phenol-formaldehyde binder. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 158-173 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/10>.

Received 15.12. 2024. Revised 21.04.2025. Accepted 26.05.2025. Published online 26.06.2025.

Введение

Фанера строительного назначения составляет около половины всей фанерной продукции, изготавливаемой в России. Для производства фанеры ФСФ применяется фенолоформальдегидное связующее (ФФС), второе по использованию в мире (после карбамидоформальдегидного связующего) [1]. Широкое распространение фанеры ФСФ в строительстве обусловлено тем, что при меньшей стоимости 1 м^3 водостойкой фанеры способен заменить от 4,3 до $4,9 \text{ м}^3$ традиционных пиломатериалов. Для использования фанеры в строительной индустрии показатели данной продукции должны отвечать нормативным требованиям, предъявляемым к строительным материалам [2].

В 2023 г. Федеральной службой государственной статистики (Росстат) было зафиксировано снижение объема производства фанеры в России на 3,265 млн. м^3 (на 1,1 %) в сравнении с 2022 г. Однако в июне 2023 г. объем производства фанеры вырос на 3,5 % по сравнению с июнем 2022 г., когда российские фанерные комбинаты еще экспортировали продукцию в страны ЕС [3]. Для достижения и сохранения тенденции роста объемов производства фанеры, в том числе фанеры ФСФ, необходим целый комплекс мер, в числе которых – повышение ее конкурентоспособности путем снижения затрат на производство. Существенный вклад в затраты на производство фанеры вносят стоимость связующего и затраты на горячее прессование. Т. Biadała с коллегами считают, что для прессования фанеры необходима температура $140 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]. По мнению Z. Qini K. Teng, температура $130 \text{ }^\circ\text{C}$ является оптимальной для прессования фанеры на модифицированном фенолоформальдегидном связующем [5]. На российских производствах фанера ФСФ прессуется обычно при температуре $120\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$ [6].

Снижение расхода фенолоформальдегидного связующего (ФФС) и уменьшение температуры горячего прессования фанеры позволяет снизить затраты. Однако следует помнить, что использование фенолоформальдегидного связующего обеспечивает длительную водостойкость только при достижении стадии резита, т.е. при прессовании в температурном интервале отверждения фенольных резольных смол $130\text{...}200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Цель данной работы – обоснованное с использованием ИК-спектроскопии и регрессионного анализа повышение механических свойств фанеры на модифицированном фенолоформальдегидном связующем, изготовленной при пониженной температуре прессования и уменьшенном расходе связующего.

В структуре фенолоформальдегидного полимера, отверждаемого при низкотемпературном режиме, имеются гидроксиметильные группы, что негативно сказывается на показателях изготавливаемых материалов [7], в том числе фанеры ФСФ.

Вопросы отверждения ФФС при более низких температурах, чем стадия резита в немодифицированном фенолоформальдегидном связующем, решаются, в числе прочих методов, использованием модификаторов на стадии синтеза смолы [8, 9], однако, по мнению Т.А. Жаббарова, эти модификации, часто улучшая некоторые показатели связующего, полученного при совместной поликонденсации, не могут существенно улучшить свойства терморезистивных композиций [10].

Существует большое количество исследований по модификации ФФС для производства фанеры [11–15]. Однако прессование фанеры при низкой температуре ($100 \text{ }^\circ\text{C}$), и низком расходе связующего (около 100 г/м^2) в настоящее время остается нерешенной проблемой из-за физико-химических особенностей отверждения фенолоформальдегидного связующего и существенного влияния расхода связующего на показатели качества фанеры.

Объектом исследования является фанера из березового шпона на фенолоформальдегидном связующем.

Предмет исследования – связи в структуре отвержденного фенолоформальдегидного связующего и фанеры, а также механические показатели фанеры, изготавливаемой при сниженном расходе связующего в условиях низкотемпературного прессования.

В данном экспериментальном исследовании изготавливалась пятислойная фанера из березового шпона при уменьшенном расходе фенолоформальдегидного связующего на основе смолы СФЖ-3014 при сниженной температуре прессования. В качестве модификатора ФФС использована сульфосалициловая кислота двухводная $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_6\text{S}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ССК),

она вводилась в связующее в водном растворе 10%-ной концентрации. Совместно с ССК в связующем использовался моноалкилфениловый эфир полиэтиленгликоля (поверхностно-активное вещество ОП-10) в количестве 1 % от массы жидкой смолы. ОП-10 вводился в растворе 10%-ной концентрации. Давление прессования составляло 2,0 МПа, время выдержки в прессе – 10 мин.

Образцы фенолоформальдегидной смолы без добавки модификатора и ФФС с добавкой 0,5 % сульфосалициловой кислоты от массы смолы отверждались в сушильном шкафу при температуре 95 °С и высушивались до постоянной массы.

ИК-спектры связующего и фанеры снимали на спектральном комплексе на базе ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10 в сторонней испытательной лаборатории ФГУП «ЦНИИХМ». Снимались спектры поглощения в области длин волн 4000–600 см⁻¹.

Анализ данных

Поскольку в отверждаемом при низкой температуре резольном фенолоформальдегидном олигомере имеются свободные гидроксиметильные группы, необходимо ввести в клеевую композицию модификатор, способный связывать эти группы. Для прессования фанеры при низкотемпературном режиме в качестве модификатора выбрана сульфосалициловая кислота.

Результаты

ИК-спектр ФФС без добавки модификатора и с добавкой ССК представлены на рис. 1, ИК-спектр фанеры на немодифицированном ФФС и фанеры на основе ФФС с добавкой сульфосалициловой кислоты – на рис. 2. Частоты и интенсивность поглощения спектров связующих приведены в табл. 1, характеристики спектров фанеры – в табл. 2.

В связующем с добавкой сульфосалициловой кислоты уменьшилось количество гидроксильных групп, участвующих в меж- и внутримолекулярных связях, интенсивность поглощения снизилась с 0,285 до 0,098. Уменьшилось также количество связанной воды, в полосе 1675–1650 см⁻¹ снизилась интенсивность поглощения. В спектре отвержденной фенолоформальдегидной смолы без модификатора присутствуют три пика в области 1400–1209 см⁻¹, обусловленные наличием гидроксиметильных групп. Глубина отверждения ФФС с модификатором увеличивается, снижается интенсивность поглощения в области деформационных колебаний связей О–Н в гидроксиметильной группе.

Пик в области 1332 см⁻¹ связан также с колебаниями групп SO₂ сульфосалициловой кислоты [20]. Результаты ИК-спектроскопии отвержденного связующего соответствуют характеристикам ИК-спектров образцов фанеры, изготовленной без добавки ССК и с добавлением сульфосалициловой кислоты.

Таблица 1

Характеристики поглощения немодифицированного фенолоформальдегидного связующего и фенолоформальдегидного связующего с добавкой сульфосалициловой кислоты

Table 1

Absorption characteristics of unmodified phenol-formaldehyde binder and phenol-formaldehyde binder with addition of sulfosalicylic acid

Вид связующего Type of binder	Частота поглощения, см ⁻¹ Absorption frequency, cm ⁻¹	Интенсивность поглощения Absorption intensity	Отнесение полос поглощения Assignment of absorption bands
Фенолоформальдегидное связующее без модификатора Phenol-formaldehyde binder without modifier	3465	0,285	Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds
Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O	3467	0,098	Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds
Фенолоформальдегидное связующее без модификатора Phenol-formaldehyde binder without modifier	1675	0,258	Деформационные колебания связей Н-О-Н, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of H-O-H bonds are caused by the presence of bound water
Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O	1650	0,068	Деформационные колебания связей Н-О-Н, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of H-O-H bonds are caused by the presence of bound water
Фенолоформальдегидное связующее без модификатора Phenol-formaldehyde binder without modifier	1400 1335 1209	0,3 0,27 0,25	Деформационные колебания связей О-Н в гидроксиметильной группе Deformation vibrations of O-H bonds in the hydroxymethyl group
Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O	1207	0,064	Деформационные колебания связей О-Н в гидроксиметильной группе Deformation vibrations of O-H bonds in the hydroxymethylgroup
Фенолоформальдегидное связующее + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O Phenol-formaldehyde binder + C ₇ H ₆ O ₆ S·2H ₂ O	1332	0,055	Колебания групп SO ₂ сульфосалициловой кислоты + деформационные колебания связей О-Н в гидроксиметильной группе Vibrations of SO ₂ groups of sulfosalicylic acid + deformation vibrations of O-H bonds in the hydroxymethyl group

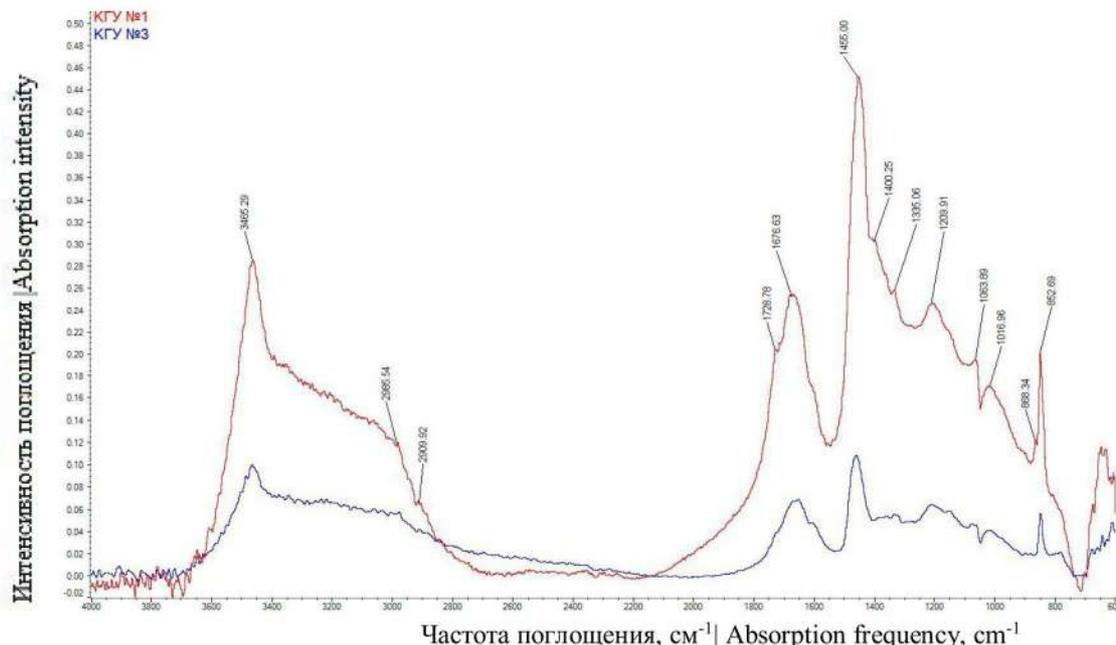


Рисунок 1. ИК-спектр фенолоформальдегидного связующего без добавки модификатора (КГУ №1) и модифицированного фенолоформальдегидного связующего (КГУ №3)

Figure 2. IR spectrum of phenol-formaldehyde binder without modifier additive (КГУ №1) and modified phenol-formaldehyde binder (КГУ №3)

Источник: данные испытательной лаборатории ФГУП «ЦНИИХМ» по заказу авторов
Source: data from the testing laboratory of FSUE «CSRICM» commissioned by the authors

Таблица 2

Характеристики поглощения фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора и фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего с добавкой сульфосалициловой кислоты

Table 2

Absorption characteristics of plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier and plywood based on phenol-formaldehyde binder with addition of sulfosalicylic acid

Вид связующего Type of binder	Частота поглощения, см ⁻¹ Absorption frequency, cm ⁻¹	Интенсивность поглощения Absorption intensity	Отнесение полос поглощения Assignment of absorption bands
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier	3374	0,122	Валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds

Деревопереработка. Химические технологии

Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$	3384	0,145	Валентные колебания OH-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных H-связях Stretching vibrations of OH groups participating in intermolecular and intramolecular H-bonds
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier	1650 1596	0,042 0,05	Деформационные колебания связей H–O–H, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of the H–O–H bonds are caused by the presence of bound water
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$	1658	0,038	Деформационные колебания связей H–O–H, обусловлены присутствием связанной воды Deformational vibrations of the H–O–H bonds are caused by the presence of bound water
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier	1332 1236	0,048 0,055	Деформационные колебания связей O–H в гидроксиметильной группе Deformation vibrations of O–H bonds in the hydroxymethyl group
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$	1332	0,055	Колебания групп SO_2 сульфосалициловой кислоты + Деформационные колебания связей O–H в гидроксиметильной группе Vibrations of SO_2 groups of sulfosalicylic acid + deformation vibrations of O–H bonds in the hydroxymethyl group
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора Plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier	2917	0,04	Валентные колебания в группах CH_2 Stretching vibrations in CH_2 groups
Фанера на основе фенолоформальдегидного связующего + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ Plywood based on phenol-formaldehyde binder + $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$	2920	0,049	Валентные колебания в группах CH_2 Stretching vibrations in CH_2 groups

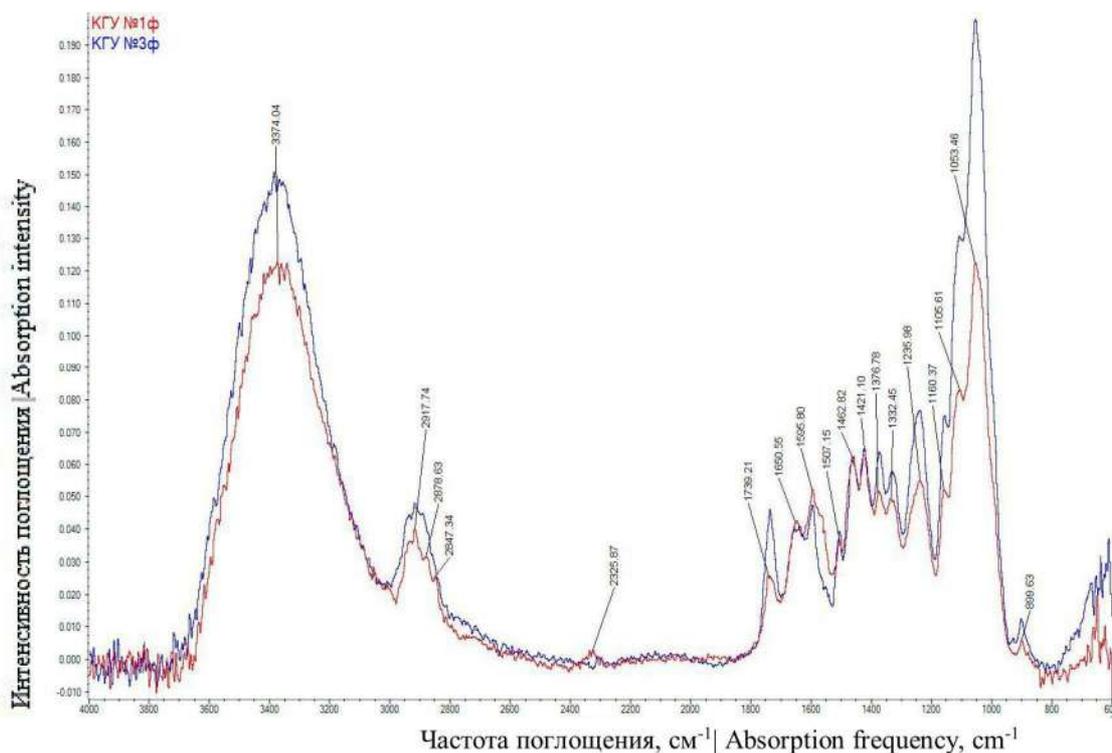


Рисунок 2. ИК-спектр фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего без модификатора (КГУ №1ф) и фанеры на основе фенолоформальдегидного связующего с добавкой сульфосалициловой кислоты (КГУ №3ф)

Figure 2. IR spectrum of plywood based on phenol-formaldehyde binder without modifier (КГУ №1ф) and plywood based on phenol-formaldehyde binder with addition of sulfosalicylic acid (КГУ №3ф)

Источник: данные испытательной лаборатории ФГУП «ЦНИИХМ» по заказу авторов
Source: data from the testing laboratory of FSUE «CSRICM» commissioned by the authors

При модификации уменьшается количество связанной воды и гидроксиметильных групп, при этом пик в области 2920 см^{-1} свидетельствует об увеличении групп CH_2 , что свидетельствует об углублении процесса поликонденсации в отвержденном связующем с добавкой ССК.

Увеличение интенсивности поглощения с 0,122 до 0,145 в спектре фанеры на связующем, модифицированном добавкой ССК, в области $3374\text{--}3384\text{ см}^{-1}$, характеризующей валентные колебания ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях, подтверждает гипотезу о создании дополнительных водородных связей между связующим и компонентами лигноуглеводного комплекса древесного шпона.

Регрессионные математические модели механических показателей фанеры: прочности при статическом изгибе, МПа (Y_1) и прочности при скалывании по клеевому слою, МПа (Y_2) разработаны в эксперименте, выполненном по В-плану 2-го порядка. Диапазоны варьирования факторов X_1 , X_2 и X_3 представлены в табл. 3. В процессе прессования фанеры основной объем парогазовой смеси выделяется при нагреве прессуемого материала до 100 °C . Поэтому диапазон варьирования фактора «Температура прессования» включает температуру кипения воды (в области около максимального уровня).

Кодированные и натуральные обозначения факторов в эксперименте, выполненном по В-плану, и результаты статистической обработки данных, полученных в опытах эксперимента, представлены в табл. 4.

Деревопереработка. Химические технологии

Таблица 3

Диапазоны варьирования факторов

Table 3

Ranges of variation of factors

Наименование фактора Name of the factor	Обозначение фактора Factor designation		Уровни варьирования Levels of variation			Интервал варьирования, Δ_i Variation interval, Δ_i
	Натуральное Natural	Кодированное Encoded	-1	0	+1	
1. Температура прессования, °C Pressing temperature, °C	Т	X ₁	85	95	105	10
2. Расход смолы, г/м ² Resin consumption, g/m ²	Р	X ₂	88	93	98	5
3. Доля добавки ССК, % The share of additive SSA, %	Д	X ₃	0	0,5	1,0	0,5

Таблица 4

В-план эксперимента и результаты статистической обработки экспериментальных данных

Table 4

B-plan and statistical processing of experimental results

№	Уровни факторов Factor levels						Средние арифметические и дисперсии результатов эксперимента Arithmetic means and dispersions of experimental results			
	в кодированных обозначениях in coded notations			в натуральных обозначениях in natural notations						
	X ₁	X ₂	X ₃	Т	Р	Д	Y _{1j}	S ² _{1j}	Y _{2j}	S ² _{2j}
						$\sigma_{и}, \text{МПа} \sigma_{в}, \text{МПа}$	$\sigma_{ск}, \text{МПа} \sigma_{сн}, \text{МПа}$			
1	+	+	+	105	98	1,0	121,5	22,4	0,98	0,071
2	-	+	+	85	98	1,0	101,4	15,36	0,89	0,075
3	+	-	+	105	88	1,0	94,3	21,05	0,93	0,024
4	-	-	+	85	88	1,0	62,7	9,55	0,05	0,001
5	+	+	-	105	98	0	113,6	6,50	1,57	0,044
6	-	+	-	85	98	0	89,4	10,8	0,52	0,035
7	+	-	-	105	88	0	82,7	12,6	0,55	0,018
8	-	-	-	85	88	0	76,4	49,28	0,05	0,002
9	+	0	0	105	93	0,5	129,6	27,14	1,39	0,078
10	-	0	0	85	93	0,5	95,3	18,10	1,08	0,015
11	0	+	0	95	98	0,5	120,6	14,28	0,75	0,002
12	0	-	0	95	88	0,5	78,5	9,66	0,26	0,012
13	0	0	+	95	93	1,0	125,5	6,00	0,70	0,034
14	0	0	-	95	93	0	82,2	25,14	0,18	0,020

Проверка однородности дисперсий результатов эксперимента проводилась по критерию Кохрена. Для прочности при статическом изгибе и прочности при скалывании по клеевому слою выполнялось соотношение: расчетное значение критерия Кохрена (G_p) меньше, чем табличное значение (G_T). Коэффициенты уравнений регрессии рассчитаны в программе «В-план». Были определены критические значения коэффициентов уравнений регрессии (свободных членов уравнений, линейных, квадратичных коэффициентов и коэффициентов парного взаимодействия). Значимыми являлись коэффициенты, модули которых больше, чем соответствующие критические значения.

Уравнения регрессии:

- для предела прочности фанеры при статическом изгибе:

$$Y_1 = 111,57 + 11,65X_1 + 15,19X_2 + 6,105X_3 + 0,909X_1^2 - 11,991X_2^2 - 7,681X_3^2 + 0,80X_1X_2 + 2,65X_1X_3 + 2,75X_2X_3; \quad (1)$$

- для предела прочности фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч:

$$Y_2 = 0,748 + 0,302X_1 + 0,306X_2 + 0,040X_3 + 0,287X_1^2 - 0,243X_2^2 - 0,273X_3^2 - 0,096X_1X_3 - 0,099X_2X_3. \quad (2)$$

Были рассчитаны дисперсии адекватности $S^2_{ад}$ и дисперсии воспроизводимости S^2_y регрессионных моделей. Однородность данных дисперсий проверена по критерию Фишера. Проверка адекватности регрессионных математических моделей подтвердила, что модели адекватны, то есть различия между значениями, рассчитанными по уравнениям регрессии (для опытов 1–14), и средними арифметическими значениями результатов определения выходных величин в опытах сопоставимы со средним рассеянием в эксперименте.

Графики значений показателя предела прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч при использовании в качестве модификатора сульфосалициловой кислоты представлены на рис. 3.

Обсуждение

Снижение расхода смолы до 88 г/м² и уменьшение температуры прессования фанеры до 85 °С на не модифицированном связующем обеспечивает не самые низкие показатели предела прочности материала при статическом изгибе – 76,4 МПа, но максимально снижает адгезионную прочность – 0,05 МПа. Образцы фанеры при испытании на скалывание после кипячения разрушаются уже при нагрузке 20...24 кгс, причем скалывание идет по клеевому слою. Значение показателя предела прочности при скалывании по клеевому слою (0,05 МПа) не соответствует требованию действующего государственного стандарта ГОСТ 3916.1-2018. Минимально допустимое значение предела прочности при скалывании по указанному стандарту составляет 0,2 МПа.

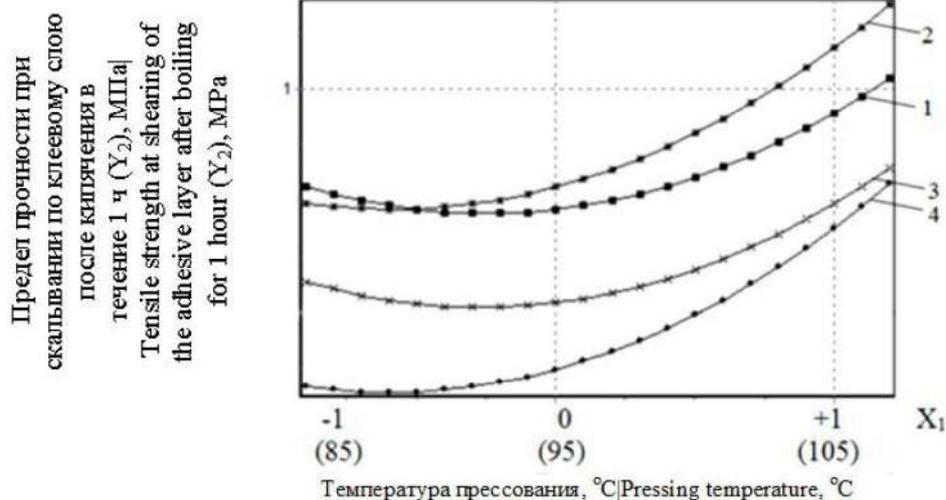
В центре плана эксперимента – при температуре прессования 95 °С, расходе смолы 93 г/м² и расходе ССК 0,5 % от массы смолы прочность фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения составляет 0,748 МПа, прочность образцов при статическом изгибе – 111,57 МПа. Данное улучшение, по нашему мнению, объясняется увеличением числа пространственных связей в структуре отверждающегося связующего – между функциональными группами молекул сульфосалициловой кислоты и фенолоспиртами фенолоформальдегидного связующего, а также между метилольными группами целлюлозы березового шпона и молекулами сульфосалициловой кислоты.

При использовании в качестве модификатора 0,5 % сульфосалициловой кислоты наибольшее (для данной добавки) значение предела прочности при скалывании по клеевому слою достигается при максимальных значениях температуры прессования и расхода связующего. Более высокое значение доли добавки сульфосалициловой кислоты является избыточным для данных условий. Возможная причина этого заключается в том, что отверждение связующего начинается до приложения давления прессования, прочность при скалывании снижается с увеличением доли добавки в интервале 0,5...1,0 %.

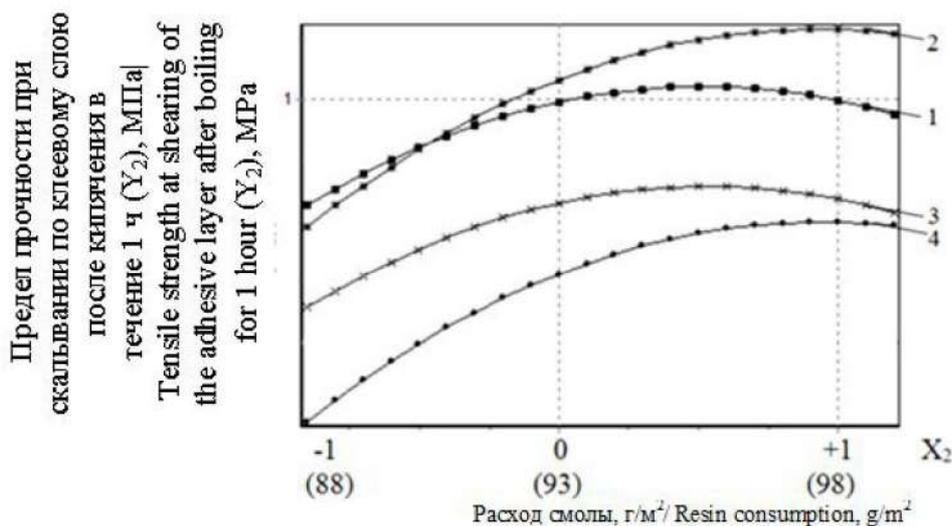
Анализ регрессионных моделей позволил сделать следующие выводы. При изготовлении фанеры на модифицированном связующем при температуре прессования 100 °С ($X_1 = 0,5$ в кодированных

Деревопереработка. Химические технологии

обозначениях), расходе смолы 98 г/м² ($X_2 = 1$) и расходе ССК 0,5 % от массы смолы ($X_3 = 0$) прочность фанеры при скалывании составит 1,03 МПа. При режимах производства $T = 105$ °С ($X_1 = 1$), расходе смолы 93 г/м² ($X_2 = 0$) и расходе ССК 0,5 % от массы смолы ($X_3 = 0$) прочность фанеры при скалывании составит 1,34 МПа.



1 – $X_2 = 1, X_3 = 1$; 2 – $X_2 = 1, X_3 = -1$; 3 – $X_2 = -1, X_3 = 1$; 4 – $X_2 = -1, X_3 = -1$



1 – $X_1 = 1, X_3 = 1$; 2 – $X_1 = 1, X_3 = -1$; 3 – $X_1 = -1, X_3 = 1$; 4 – $X_1 = -1, X_3 = -1$.

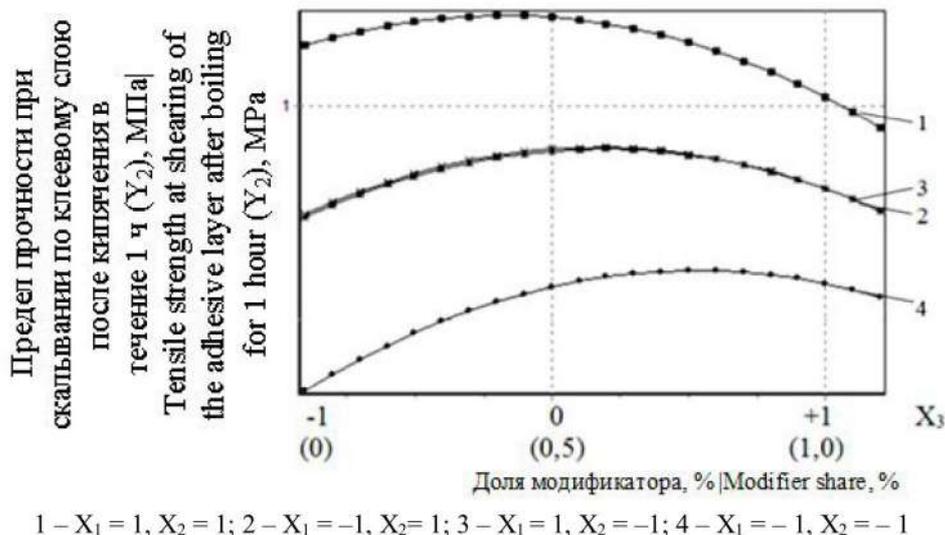


Рисунок 3. Зависимости предела прочности фанеры при скальвании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч от температуры прессования, расхода фенолоформальдегидной смолы и доли добавки модификатора

Figure 3. Dependence of the tensile strength of plywood when chipping along the adhesive layer after boiling for 1 hour on the pressing temperature, consumption of phenol-formaldehyde resin and the proportion of the additive modifier

Выводы

Использование ИК-спектроскопии показало, что добавка в связующее ССК уменьшает количество гидроксиметильных групп, сорбирующих воду в процессе эксплуатации фанеры ФСФ, а также снижающих прочность фанеры при скальвании по клеевому слою.

При модификации ФФС добавкой сульфосалициловой кислоты увеличивается прочность фанеры при статическом изгибе, это обусловлено созданием дополнительных межмолекулярных водородных связей между связующим и древесными компонентами.

Повышение прочности при статическом изгибе фанеры, изготавливаемой в условиях пониженной температуры и сниженного расхода связующего, даст возможность фанерным предприятиям производить конкурентоспособную продукцию для использования в строительстве, в вагоностроении и других областях использования. Целесообразность предлагаемых технологических решений была проверена экономическими расчетами. Экономические расчеты показали, что предложенные решения по

снижению температуры прессования и расхода фенолоформальдегидного связующего при использовании добавки ССК позволят сократить затраты условного предприятия на 23,78 млн. руб. в год (при годовом объеме производства фанеры ФСФ 100 000 м³).

Таким образом, в исследовании решена поставленная задача обоснования с использованием ИК-спектроскопии и регрессионного анализа повышения прочности фанеры ФСФ, производимой при низкотемпературном прессовании и сниженном расходе связующего, путем модификации связующего добавкой сульфосалициловой кислоты.

Список литературы

1. Hunt C.G, Dunky M. Analysis of future prospects and opportunities for wood adhesives: a review. *Forest Products Journal*. 2023; 72(s2): 14-22. – DOI: 10.13073/FPJ-D-23-00011.
2. Chatzimichailidou M., Dabic D., Härkönen R. Opportunities and challenges of using plywood in data-driven parametric building construction. In book: *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. 2023: 635-642. – DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_69.
3. Рынок фанеры 2021-2023: Производство, цены и перспективы до 2027 года. – URL: <https://xn--7sbbgbd-jecb2aeeqwgkjh2a6aao4uje.xn--p1ai/news/rynok-proizvodstva-fanery-2021-2023>.
4. Biadała T., Czarnecki R., Dukarska D. Water resistant plywood of increased elasticity produced from european wood species. *Wood Research*. 2020; 65(1): 111-124. – DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.1.111124.
5. Qin Z., Teng K. Mechanical model and changed chemical structure of phenol-formaldehyde adhesive on plywood with different hot press process. *The Journal of Adhesion*. 2021; 98(15): 2348-2365. – DOI: 10.1080/00218464.2021.1970545.
6. Производство фанеры от А до Я. FORESTCOMPLEX.RU – URL: <https://forestcomplex.ru/wood-based/proizvodstvo-faneryi-ot-a-do-ya/>.
7. Mohammad A., Naheed S., Mohammad J., Mohammed N., Mohammed P. et al. A review on phenolic resin and its composites. *Current Analytical Chemistry*. 2018; 14(3): 185-197. – DOI: 10.2174/1573411013666171003154410.
8. Sahoo S.C., Sil A. Synthesis and characterization of modified low curing phenol-formaldehyde resin for manufacture of wood composites. *International Journal of Modern Agriculture*. 2021; 10: 2. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/374478288>.
9. Hasan M.S, Al-Azzawi A.M. Synthesis, modification and characterization of new phenolic resins linked to Tetra-bromophthalimide. *Iraqi Journal of Science*. 2023; 64(6): 2681-2695. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/329589007>.
10. Жаббаров Т.А. Современные методы модификации феноло-формальдегидных олигомеров // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн.* – 2021. – 6(84). – URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11718>.
11. Fitriani F., Lubis M.A.R., Hadi Y.S., Sari R.K., Muhammad I.M. et al. Adhesion and cohesion strength of phenol-formaldehyde resin mixed with different types and levels of catalyst for wood composites. *Journal of Composites Science*. 2023; 7:310. – DOI: 10.3390/jcs7080310.
12. Hamad S.F., Nicholas T.H.F., Teng. F., Nur F.S., Julian S.D. et al. Optimizing size and distribution of voids in phenolic resins through the choice of catalyst types. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019; 136(47):48249. – DOI: 10.1002/app.48249.
13. Bekhta P., Sedliacik J., Kusniak I., Gryc V., Pipiska T. et al. Enhancing the properties of thermoplastic-bonded plywood by treating the birch veneers with citric acid. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024; 134:103781. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103781.
14. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Siuda J., Sedliačik J. Microcellulose as a modifier for UF and PF resins allowing the reduction of adhesive application in plywood manufacturing. *ActaFacultatisXylogologiae*. 2021; 63(2): 31-38. – DOI: 10.17423/afx.2021.63.2.03.
15. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R. The possible reduction of phenol-formaldehyde resin spread rate by its nanocellulose-reinforcement in plywood manufacturing process. *Annals of WULS SGGW (Forestry and Wood Technology)*. 2020; 111; 21-26. – DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6420>.
16. Fedotov A.A., Vahnina T.N., Susoeva I.V. Resistance to temperature and humidity changes of construction plywood and thermal-insulation boards. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 105(5). – URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2021.105.6/ArticleNo.10506>. – DOI: 10.34910/MCE.105.6.
17. Пьянова Л.Г., Лавренов А.В., Леонтьева Н.Н., Седанова А.В., Делягина М.С., Корниенко Н.В. Физико-химические и биоспецифические свойства сорбента, полученного на основе наноглобулярного углерода и

- сульфосалициловой кислоты // Актуальные физико-химические проблемы адсорбции и синтеза нанопористых материалов: всероссийский симпозиум с международным участием, посвященный памяти В.А. Авраменко. Москва: ИФХЭ РАН. – 2022. – С. 33. – URL: <https://adsorption.phyche.ac.ru/images/Proceedings-Adsorption-Dubin-2022-10.10.2022.pdf> (phyche.ac.ru).
18. Клевцова М.В., Протопопов А.В. Получение сложных эфиров целлюлозы с сульфосалициловой и бензойной кислотами из оболочки овса // Ползуновский вестник. – 2016. – 2. – С. 181–185. – URL: <https://globalf5.com/>.
19. Qiaolong Z.S., Shuangmei H., Chung-Yun H., Jianchun J., Junming X. 5-Sulfosalicylic acid as an acid hydrotrope for the rapid and green fractionation of woody biomass. *Industrial Crops and Products*. 2022; 177:114435. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114435.
20. Васильев А.В. Инфракрасная спектроскопия. Введение в спектроскопию. Санкт-Петербург: СПбГУ. – 162 с. – URL: <https://chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/InfraRedSpektr.pdf>.

References

1. Hunt C.G, Dunky M. *Analysis of future prospects and opportunities for wood adhesives: a review*. *Forest Products Journal*. 2023; 72(s2): 14-22. DOI: 10.13073/FPJ-D-23-00011.
2. Chatzimichailidou M., Dabic D., Härkönen R. *Opportunities and challenges of using plywood in data-driven parametric building construction*. In book: *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. 2023: 635-642. DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_69.
3. *Rynek fanery 2021-2023: Produkcja, ceny i perspektywy do 2027 roku*. [Plywood market 2021-2023: Production, prices and prospects until 2027]. (In Russ.). URL: <https://xn-7sbbgbdjeb2aeeqwgvkjh2a6aao4uje.xn--plai/news/rynok-proizvodstva-fanery-2021-2023>.
4. Biadała T., Czarniecki R., Dukarska D. *Water resistant plywood of increased elasticity produced from european wood species*. *Wood Research*. 2020; 65(1): 111-124. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.1.111124.
5. Qin Z., Teng K. *Mechanical model and changed chemical structure of phenol-formaldehyde adhesive on plywood with different hot press process*. *The Journal of Adhesion*. 2021; 98(15): 2348-2365. DOI: 10.1080/00218464.2021.1970545.
6. *Produkcja fanery od A do JA*. [Plywood production from A to I]. FORESTCOMPLEX.RU. (In Russ.). URL: <https://forestcomplex.ru/wood-based/proizvodstvo-fanery-ot-a-do-ya/>
7. Mohammad A., Naheed S., Mohammad J., Mohammed N., Mohammed P. et al. *A review on phenolic resin and its composites*. *Current Analytical Chemistry*. 2018; 14(3): 185-197. DOI: 10.2174/1573411013666171003154410.
8. Sahoo S.C., Sil A. *Synthesis and characterization of modified low curing phenol-formaldehyde resin for manufacture of wood composites*. *International Journal of Modern Agriculture*. 2021; 10: 2. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374478288>.
9. Hasan M.S, Al-Azzawi A.M. *Synthesis, modification and characterization of new phenolic resins linked to Tetra-bromophthalimide*. *Iraqi Journal of Science*. 2023; 64(6): 2681-2695. URL: <https://www.researchgate.net/publication/329589007>.
10. Zhabbarov T.A. *Sovremennye metody modifikacii fenolo-formal'degidnyh oligomerov*. [Modern methods of modification of phenol-formaldehyde oligomers]. *Universum: himiya i biologiya: elektronnyj nauchnyj zhurnal = Universum: chemistry and biology: electronic scientific journal*. 2021; 6(84). (In Russ.). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11718>.
11. Fitriani F., Lubis M.A.R., Hadi Y.S., Sari R.K., Muhammad I.M. et al. *Adhesion and cohesion strength of phenol-formaldehyde resin mixed with different types and levels of catalyst for wood composites*. *Journal of Composites Science*. 2023; 7:310. DOI: 10.3390/jcs7080310.

12. Hamad S.F., Nicholas T.H.F., Teng. F., Nur F.S., Julian S.D. et al. *Optimizing size and distribution of voids in phenolic resins through the choice of catalyst types*. Journal of Applied Polymer Science. 2019; 136(47):48249. DOI: 10.1002/app.48249.
13. Bekhta P., Sedliacik J., Kusniak I., Gryc V., Pipiska T. et al. *Enhancing the properties of thermoplastic-bonded plywood by treating the birch veneers with citric acid*. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2024; 134:103781. DOI: 10.1016/j.ijadhadh. 2024.103781.
14. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Siuda J., Sedliačik J. *Microcellulose as a modifier for UF and PF resins allowing the reduction of adhesive application in plywood manufacturing*. ActaFacultatisXylogologiae. 2021; 63(2): 31-38. DOI: 10.17423/afx.2021.63.2.03.
15. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R. *The possible reduction of phenol-formaldehyde resin spread rate by its nano-cellulose-reinforcement in plywood manufacturing process*. Annals of WULS SGGW (Forestry and Wood Technology). 2020; 111; 21-26. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6420>.
16. Fedotov A.A., Vahnina T.N., Susoeva I.V. *Resistance to temperature and humidity changes of construction plywood and thermal-insulation boards*. Magazine of Civil Engineering. 2021; 105(5). Article No. 10506. DOI: 10.34910/MCE.105.6.
17. Pyanova L.G., Lavrenov A.V., Leontyeva N.N., Sedanova A.V., Delyagina M.S., Kornienko N.V. *Fiziko-himicheskie i biospecificheskie svojstva sorbenta, poluchennogo na osnove nanoglobulyarnogo ugleroda i sul'fosalicilovoj kisloty*. [Physicochemical and biospecific properties of a sorbent obtained on the basis of nanoglobular carbon and sulfosalicylic acid]. Aktual'nye fiziko-himicheskie problemy adsorbicii i sinteza nanoporistykh materialov: vserossijskij simpozium s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennyj pamyati V.A. Avramenko = Actual physico-chemical problems of adsorption and synthesis of nanoporous materials: All-Russian symposium with international participation, dedicated to the memory of V.A. Avramenko. – Moscow: IFHE RAS, 2022. (In Russ.). URL: <https://adsorption.phyche.ac.ru/images/Proceedings-Adsorption-Dubinina-2022-10.10.2022.pdf> (phyche.ac.ru)
18. Klevtsova M.V., Protopopov A.V. *Poluchenie slozhnykh efirov cellyulozy s sul'fosalicilovoj i benzojnoj kislotami iz obolochki ovsa*. [Obtaining cellulose esters with sulfosalicylic and benzoic acids from oat husks]. Polzunovskij vestnik = Polzunovsky Vestnik. 2016; 2: 181–185. (In Russ.). URL: <https://globalf5.com/>.
19. Qiaolong Z.S., Shuangmei H., Chung-Yun H., Jianchun J., Junming X. *5-Sulfosalicylic acid as an acid hydrotrope for the rapid and green fractionation of woody biomass*. Industrial Crops and Products. 2022; 177:114435. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114435.
20. Vasiliev A.V. *Infrakrasnaya spektroskopiya. Vvedenie v spektroskopiyu*. [Infrared spectroscopy. Introduction to spectroscopy]. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 162 p. (In Russ.). URL: <https://chem.spbu.ru/files/Vladimir/Vasiliev/InfraRedSpektr.pdf>

Сведения об авторах

Вахнина Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>, e-mail: t_vachnina@mail.ru.

✉ *Федотов Александр Андреевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>, e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Сусоева Ирина Вячеславовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>, e-mail: i.susoeva@yandex.ru.

Information about authors

Tatyana N. Vachnina – Ph. D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of logging and wood processing industries Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Kostroma state University», Kostroma, Russian Federation, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7201-5979>, e-mail: t_vachnina@mail.ru.

✉ *Alexander A. Fedotov* – Ph. D in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of logging and wood processing industries Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Kostroma state University», Kostroma, Russian Federation, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3668-899X>, e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Irina V. Susoeva – doctor of engineering, Associate Professor, Professor of department of logging and wood processing industries Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Kostroma state University», Kostroma, Russian Federation, 156005, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-8934>, e-mail: i.susoeva@yandex.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding

Нейросетевой блок ПИД-регулятора корректировки настройки параметров гидроагрегата лесной машины

Елена В. Головина, GolovinaEV@volgatech.net

Александр И. Павлов, PavlovAI@volgatech.net

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д.3, г. Йошкар-Ола, 424000, Российская Федерация

Аннотация

Корректировка настройки системы управления мощностью гидроагрегата лесной машины можно производить через ПИД-регулятор. В случае обнаружения неисправного состояния гидроагрегата блок вносит изменения в систему управления. Поэтому целью исследования стало повышение надежности гидроманипуляторов лесных машин путем внедрения нейросетевого блока ПИД-регулятора в управление гидроманипулятором форвардера. К методам исследования относятся методы моделирования системы автоматического управления в контурах с обратной связью для автоматического поддержания параметров процесса в гидроприводах лесных машин. Результатом исследования будет программа для управления работой гидроаппаратов манипулятора форвардера через управляющие сигналы, формируемые ПИД-регулятором. При выборе оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора для оптимизации работы автоматической системы управления давлением сигналы будут контролировать, регулировать и изменять отклонения характеристик системы, что повышает надежность работы гидроманипулятора. Существуют различные подходы к моделированию и разработке интеллектуальных гидравлических систем, что может привести к трудностям в совместимости и взаимодействии различных компонентов и устройств. Очень часто ученые опираются в моделировании процессов через программаторы вида MATLAB. Но использование самого контроллера и его программного обеспечения в ПИД-регулировании параметров гидравлического привода лесной машины практически остается не исследованным, поэтому данная тема является актуальной. В данном исследовании возможность применимости ПИД-регулирования состояния параметров системы (давления через открытие дроссельного сечения) через программу контроллера ПЛК ОВЕН160 CODESYS V2.3 позволяет уменьшить колебания системы и увеличить скорость исправления ошибки в гидросистеме, подводя текущие значения давления к уставке, что повышает надежность лесной машины.

Ключевые слова: гидропривод, управляющая программа CODESYS V2.3, нейросетевой блок, надежность, коэффициенты ПИД-регулятора.

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: Головина, Е. В. Нейросетевой блок ПИД-регулятора корректировки настройки параметров гидроагрегата лесной машины / Е. В. Головина, А. И. Павлов // Лесотехнический журнал. – 2025. – № 2 (58). – С. 174-190. – Библиогр.: с. 186-190 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/11>.

Поступила 12.02.2025. Пересмотрена 24.04.2025. Принята 26.05.2025. Опубликовано онлайн 26.06.2025.

Neural network block of PID controller for adjusting the control system settings of a forest machine hydraulic unit

Elena V. Golovina, GolovinaEV@volgatech.net

Alexander I. Pavlov, PavlovAI@volgatech.net

Volga Region State Technological University, Lenin Square, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

Abstract

The adjustment of the forest machine hydraulic unit power control system can be made through the PID controller. If a hydraulic unit malfunction is detected, the block makes changes to the control system. Therefore, the aim of the study was to increase the reliability of forest machine hydraulic manipulators by introducing a neural network PID controller block into the control of the forwarder hydraulic manipulator. The research methods include methods for modeling the automatic control system in feedback loops for automatically maintaining process parameters in forest machine hydraulic drives. The result of the study will be a program for controlling the operation of the forwarder manipulator hydraulic devices through control signals generated by the PID controller. When selecting the optimal PID controller coefficients to optimize the operation of the automatic pressure control system, the signals will monitor, regulate and change the deviations in the system characteristics, which increases the reliability of the hydraulic manipulator. There are various approaches to modeling and developing intelligent hydraulic systems, which can lead to difficulties in the compatibility and interaction of various components and devices. Very often, scientists rely on MATLAB-type programmers in modeling processes. But the use of the controller itself and its software in PID control of the parameters of the hydraulic drive of a forest machine remains practically unexplored, so this topic is relevant. In this study, the possibility of applicability of PID control of the state of the system parameters (pressure through the opening of the throttle section) through the PLC controller program OWEN160 CODESYS V2.3 allows to reduce system oscillations and increase the speed of error correction in the hydraulic system, bringing the current pressure values to the setpoint, which increases the reliability of the forest machine.

Keywords: hydraulic drive, control program CODESYS V2.3, neural network block, reliability, PID controller coefficients.

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Golovina E. V., Pavlov A. I. (2025) Neural network block of PID controller for adjusting the settings of forest machine hydraulic unit parameters. *Forestry Engineering journal*, Vol.15, No. 2 (58). pp. 174-190 (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/11>.

Received 12.02.2025. *Revised* 24.04.2025. *Accepted* 26.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

ПИД-регулятор – это механизм, используемый в управляющих контурах с обратной связью для автоматического поддержания некоторого параметра процесса на определённом уровне.

На контроллер подается входной сигнал от датчиков, в результате на базе полученных данных происходит сравнение текущей регулируемой величины с заданным значением (уставкой). На основе их разницы алгоритм будет вычислять управляющий сигнал и отправлять его к исполнительному механизму.

Управляющий сигнал, формируемый ПИД-регулятором, представляет собой сумму трёх составляющих:

1) Пропорциональная составляющая. При разнице заданного значения параметра и его фактического устанавливается пропорциональный сигнал данному отклонению. Чем больше отклонение характеристики, тем выше формируемый сигнал.

2) Интегральная – пропорциональна интегралу по времени от отклонения величины контролируемой характеристики.

3) Дифференциальная, которая увеличивается и уменьшается пропорционально скорости изменения контролируемого параметра.

Функциональная схема измерителей–регуляторов представлена на рис. 1, где логические устройства формируют управляющие сигналы для выходных устройств, выходные устройства служат для передачи регистрирующих или управляющих сигналов на исполнительные механизмы.



Рисунок 1. Функциональная схема измерителей–регуляторов

Figure. 1. Functional diagram of measuring controllers

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Исследованию применения нейронной сети на основе ПИД–регулирования в управлении гидравлических приводов посвящено множество проводимых исследований в рамках технических наук. А вопросы автоматизации и интеллектуализации привлекают внимание большого количества исследователей, среди которых есть как зарубежные (Э. Альмодареси, Ф. Зишан, Лю Сяозэр, М.Я. Кошкун и др), так и отечественные (А.Г. Баханович, В.В. Денисенко, М.В. Бураков, К.А. Труханов и др.). Причем, основное внимание зарубежных исследователей направлено на сравнительный анализ различных реализаций генетического алгоритма для оптимизации

технологической системы. Ф. Зишан и Э. Акбари и др. (2022) [1] при исследовании эффективной системы ПИД-регулирования для стабилизации частоты в независимой микросети применили гибридный алгоритм PSO-GSA. Данный метод позволяет определить целевую функцию с учетом времени и изменений частоты системы, а поиск параметров сводится в задачу оптимизации. Аналогичное исследование провел Barakat M. (2022) [2], предложив двухзональный блок без повторного нагрева, который был протестирован в условиях нелинейности нечувствительной зоны регулятора.

Chotikunnan P. и Chotikunnan R. (2023) [3] представили архитектуру ПИД-контроллера с двойным контуром, которая направлена на повышение производительности системы за счет уменьшения перерегулирования и экономии электроэнергии. Использование ошибки в реальном времени и однократной задержки приводит к корректировке коэффициентов регулятора и появляется возможность более четкой работы системы.

Almodaresi E. и Vozorg M. (2017) [4] в своих исследованиях предложили метод Д-разложения для ПИД-регулирования процессов разомкнутой системы через теоретические модели. Применяя метод пространственных параметров для вычисления устойчивых областей коэффициентов регулятора. Преимуществом данного метода является то, что для построения границ устойчивости нет необходимости изменения коэффициента усиления ПИД-регулятора.

Интеллектуальный ПИД-регулятор, представленный в исследованиях Coskun M.Y. и İtik M. (2023) [5], превосходит даже оптимизированный ПИД-регулятор для позиционного управления нелинейной электрогидравлической системой с неопределенными характеристиками клапанов и колебаниями давления в системе подачи. Также было предложен контроллер ANFIS для отслеживания усилия с помощью численного моделирования.

В исследовании же отечественных авторов в области нейронных сетей и ПИД-регуляторов в компьютерном управлении технологическим процессом, экспериментом и оборудованием можно выделить работу Посметьева В.И., Никонова В.О.

(2023) [6]. В своей статье «Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда» через математическую модель и компьютерную программу работы гидравлического манипулятора позволили оценить рекуперированную энергию и амплитуду раскачивания перемещаемого груза. Это позволило повысить точность и автоматизацию процессов управления гидроприводом. Палкин Г.А. и Гайсин А.Ф. (2021) [7] в своей работе выделяют важным фактором для поддержания оптимальной уставки подачи насоса использование ПИД-регулятора, имитационная модель которого была эффективно проверена, а предложенная концепция управления участком первого подъема показали высокую технико-экономическую эффективность. Баханович А.Г. и др. (2017) [8] в своем исследовании по применению программно-аппаратной платформы пневматического привода регулятора топливного насоса высокого давления реализовали использование ПИД-регулятора непрерывного действия. Разработанная стратегия дает возможность в режиме реального времени отследить отклонение регулируемого параметра от заданной величины и практически мгновенно выработать управляющее воздействие на исполнительные механизмы для устранения этого отклонения.

Балобанов Е.Н. и Емельянова М.С. (2022) [9] в своей исследовательской работе «К вопросу разработки системы управления гидравлической машиной для проведения циклических испытаний металлических образцов» на базе 32-битного микроконтроллера разработали ПИД-регулятор, контролирующий циклические процессы при работе пары «гидроцилиндр – сервоклапан», а также дали практические рекомендации по быстродействию ПИД-регулятора.

Куликова И.В. (2021) [10] в своем исследовании для нечеткого регулирования параметрами системы предложила математическую модель регулятора типа Такаги-Сугено-Канга нулевого и первого порядков. С помощью генератора случайных чисел реализуются некоторые операции генетического алгоритма через авторскую программу.

Для повышения энергетической эффективности объемных гидроприводов технологических машин и оборудования Кожухов А.В. и Невзорова М.Ю. (2016) [11] также предложили применение частотного преобразователя для бесступенчатого регулирования скорости движения выходного звена, что предопределяет легкое регулирование, экономичность и возможность создания авторегулируемого гидропривода

Труханов К.А. (2018) [12] в своем исследовании «Цифровой ПИД–регулятор для пневмо- и гидросистем» доказал эффективность реализации цифрового ПИД–регулятора для управления пневмо/гидросистемой. В его исследовании приведена блок-схема аналоговой и цифровой систем управления с пропорциональным пневмораспределителем. Качество данных систем оценивалось во временной области переходного процесса и максимальной динамической ошибкой.

В своей статье «Идентификация нелинейной системы управления с ПИД–регулятором» Прокопьев А.П., В.И. Иванчура и др. (2015) [13] на основе модального метода разработали методику синтеза ПИД–регулятора нелинейной системы управления. В их исследовании было доказано, что в системе управления с гидравлическим приводом с имеющимися признаками нелинейности необходимо отсутствие перерегулирования.

Как говорилось ранее, существуют различные подходы к моделированию и разработке интеллектуальных гидравлических систем, отраженные в исследованиях Алёхина М. В., Петросяна А. Е. и др. (2017) [14], Гулай В. А., Дубовик А. В и др. (2024) [15], Filo G (2023) [16], Мирзалиева С. А. и Шарипова К.Л. (2019) [17], Пастухова И. С. и Целищева В. А (2020) [18], Санталова А. А. (2021) [19], Фрянова В. Н. и Павловой Л. Д. (2016) [20], Хиникадзе Т. А., Рыбак А. Т. и др. (2021) [21], Яковлева А. Ю., Красной А. А. и др. (2021) [22], Thai N. H. (2022) [23], Yang X. и др. (2024) [24], что может привести к трудностям в совместимости и взаимодействии различных компонентов и устройств. В исследованиях ученых Хропакова Д. И. (2019) [25], Голякевич С. А., Горонковский А. Р. и др. (2019) [26] говорится о моделировании данных процессов через программаторы вида MATLAB.

В данной работе цель исследования достигается через решение задачи поиска коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора. Наиболее приемлемым методом нахождения считается метод Циглера–Никольса, о котором говорится в исследованиях Попадьяина А.Н. в статье «Автоматизированная настройка ПИД–регулятора для управления следящим приводом с использованием программного пакета MATLAB SIMULINK» [27].

Предполагается осуществлять ПИД–регулирование через управляющую программу в среде программирования CODESYS V2.3 для ПЛК ОВЕН160 на языке программирования SFC. Согласно этой программе нейросетевой блок ПИД–регулятора способен корректировать настройки системы управления мощностью гидроагрегата лесной машины через изменение давления.

В случае обнаружения неисправного состояния гидроагрегата блок вносит изменения в систему управления, повлияв на ошибку. Тем самым ПИД–регулятор, внедренный в систему управления гидравлическим приводом, позволяет улучшить его динамические свойства и повысить надежность всей системы.

Адекватность работы модели нейросетевого блока ПИД–регулятора через среду программирования CODESYS проверяется в режиме эмуляции в авторской компьютерной программе, а реализацию проекта в лабораторных условиях предполагается выполнить в ближайшее время.

Материалы и методы

В данной работе подразумевается применение нейронной сети через определение текущего состояния гидроагрегата и через прогнозирование технического состояния для уменьшения или увеличения управляющего сигнала, поддерживающего параметры гидроагрегата. Именно таким образом, в случае обнаружения неисправного состояния производится корректировка настроек системы управления гидравлическим распределителем.

В качестве входных параметров ПИД–регулятора выступают данные от датчиков давления

и расхода жидкости. В качестве выходных параметров – управляющие сигналы на электромагниты пропорционального гидравлического распределителя с электромагнитным управлением РЭМ120. Регулятор формирует выходной управляющий сигнал для электромагнита распределителя.

ПИД-регулятор, отмеченный в Глоссарии [28] вырабатывает выходной сигнал, который рассчитывается по следующей формуле:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \cdot \left[E_i + \tau_d \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} \right] \cdot 100\%, \quad (1)$$

где X_p – полоса пропорциональности; E_i – рассогласование; τ_d – постоянная времени дифференцирования; ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} ; $\Delta t_{\text{изм}}$ – время между двумя соседними измерениями t_i и t_{i-1} ; τ_i – постоянная времени интегрирования; $\sum_{i=0}^n E_i$ – накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

Внедрение в систему управления гидравлического привода манипулятора лесной машины ПЛК ОВЕН, а также датчиков обратных связей, позволяет внести высокую точность в регулировании давления гидроаппаратуры.

Из формулы (1) пропорциональное регулирование (П-закон) раскрывает пропорциональную зависимость выходного сигнала Y_i регулятора от величины рассогласования E_i , представлена в формуле:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \cdot E_i \cdot 100\%. \quad (2)$$

Полоса пропорциональности X_p , как и отклонение E_i , выражается в единицах контролируемого параметра (в нашем случае это давление). Чем шире полоса пропорциональности X_p , тем меньше величина выходного сигнала Y_i при одном и том же отклонении E_i .

Дифференциальная часть в формуле (1) отвечает за единичное возмущение внутри импульса ШИМ-сигнала.

Перед исследованием была поставлена задача, решить ее предполагается через составление кода программы управления.

Гидравлический распределитель РЭМ120 с электроприводом и пропорциональным управлением. С открытием дроссельного сечения канала распределителя увеличивается давление рабочей жидкости в системе. Чем больше сечение пропускного канала, тем выше давление в системе, и тем выше усилие, создаваемое рабочим гидроцилиндром.

Время полного открытия или закрытия сечения – 0,5 с.

Измерения усилия штока цилиндра производятся с помощью тензOMETрического датчика.

Оператор вручную выводит систему на нужную ступень нагружения, используя для управления необходимые кнопки.

Но вместо оператора создан автоматический ввод на заданную точку с помощью ПЛК ОВЕН160.

С увеличением давления рабочей жидкости отклик системы становится более динамичным. При этом для нагружения 1500, 3000, 4500 кгс необходимо достаточно долго удерживать кнопку на закрывание сечения, это дает максимальное приближение к требуемой точке.

На последних ступенях нагружения (12000, 13500, 15000 кгс) даже быстрое нажатие приводит к существенному увеличению усилия в гидроцилиндре.

Основное усилие в изменение сигнала управления давлением в гидросистеме дает пропорциональное управление. Именно его считают главной движущей силой в контроллере. Сигнал на выходе контроллера изменяется пропорционально ошибке. Необходимо обратить внимание на то, что увеличение ошибки, приведет к пропорциональному возрастанию управляющего действия сигнала и при слишком большом усилии регулятора X_p произойдут резонансные колебания системы, возникнет угроза неустойчивости системы. Но и низкое усиление регулятора тоже может дать неадекватную реакцию контроллера на изменение параметра регулирования и уставки.

Для получения графиков ПИД-регулятора и оценки соответствия программы управления гидравлическим приводом использовалась среда программирования MATLAB Simulink. В этой среде

есть универсальный блок PID Controller, позволяющий в режиме визуализации наблюдать за изменением свойств объекта. Изменив параметры системы через значения переменной процесса, а также сигналы контроллера, можно увидеть с помощью графиков поведение ПИД – регулятора на данное возмущение.

На рисунке 2 показано как при изменении параметра и действия в результате контроллера величина ошибки не уменьшается до величины уставки (заданного значения, которое должен поддерживать регулятор в автоматическом режиме, т.е. число, к которому регулятор должен привести текущее значение с датчика).

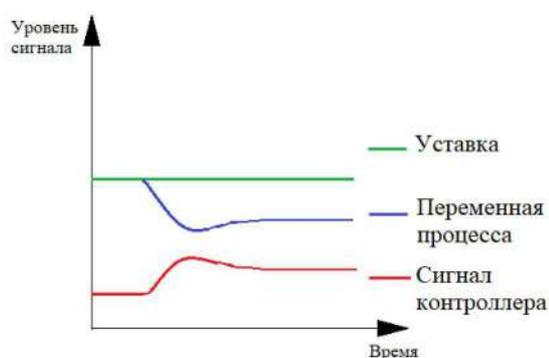


Рисунок 2. Отклик П–регулятора на возмущение
Figure 2. Response of the P-controller to disturbance
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

На рисунке 2 видно, что пропорциональная часть контроллера не дает автоматически сбросить ошибку, поэтому используют интегральный режим управления. Как только переменная процесса будет находиться в заданном интервале значений, интегральная часть контроллера без участия человека сбросит имеющуюся ошибку через увеличение или уменьшение выходного сигнала. Как показано на рисунке 3 контроллер через интегральную часть увеличивает выходной сигнал и стремится вернуть параметр давления к заданному значению на выходе. Увеличение или уменьшение сигнала будет происходить с высокой скоростью, если ошибка

принимает большое значение, и медленно – при малом значении ошибки.

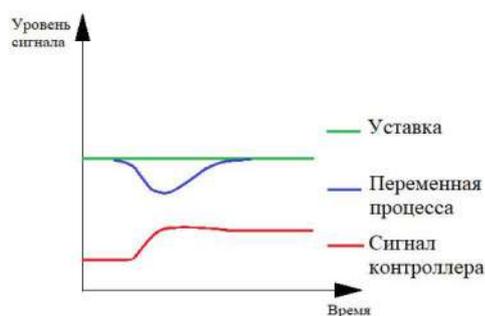


Рисунок 3. Отклик ПИ–контроллера на возмущение
Figure 3. PI controller response to disturbance
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Для ПИ–контроллера нужно учитывать интервалы времени интегрирования, потому что при длительных – контроллер будет реагировать медленно, а короткие приведут к колебаниям контура и к нестабильности системы. Автоматически контроллер будет исправлять сигнал до тех пор, пока смещение не исчезнет полностью.

Дифференциальный контроль приведет к более быстрой реакции системы на исправление ошибки. Это так называемое управление по скорости. На случай, если ошибка не меняется во времени, дифференциальная составляющая формулы (1) будет равна нулю. Поэтому для управления давлением системы данную составляющую контроллера применяют редко. Как и для ПИ–регулятора у дифференциальной части есть свои исключения: если настройка τ_d будет установлена слишком большой, то будут возникать колебания и контур управления станет нестабильным.

Алгоритм неинтерактивного (идеального) ПИД–регулятора представлен на рисунке 4 и соответствует работе согласно формуле (1). Благодаря дифференциальному режиму обеспечивается большее и быстрое управляющее воздействие, чем при управлении только П– или ПИ–регулированием.

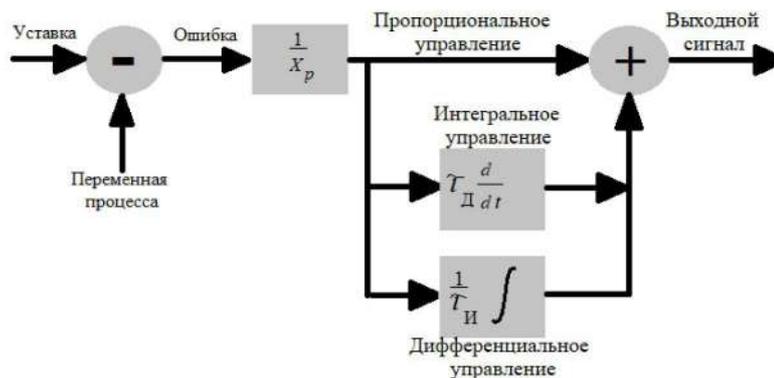


Рисунок 4. Алгоритм работы идеального ПИД-регулятора

Figure 4. Algorithm of operation of an ideal PID controller

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результат применения ПИД-управления параметрами системы для уменьшения влияния возмущения и сокращения времени возврата к заданному значению продемонстрирован на рис. 5.

Алгоритм работы ПИД-регулятора:

1. ПИД-регулятор с определенной периодичностью опрашивает текущее значение и вычисляет рассогласование. Ошибка (рассогласование) вычисляется как разность задания и текущего значения усилия.

При написании программы управления, часть которой представлено на рисунке 6, использовались функциональные блоки для таймера временных ШИМ-сигналов и для нахождения разницы между соседними измерениями рассогласования.

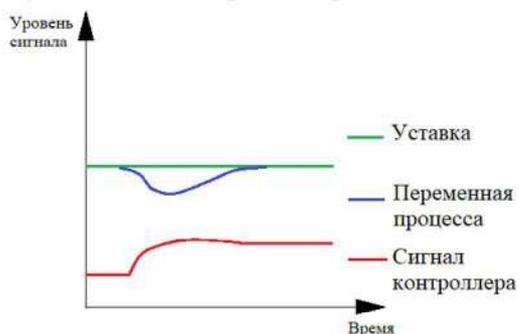


Рисунок 5. Реакция ПИД-контроллера на возмущение

Figure 5. PID controller response to disturbance

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Функции памяти опираются на блоки триггеров по заднему и переднему фронтам для включения и выключения переменной, когда происходит прекращение сигнала.

Блоки «Delta» и «Delta_last» – это рассогласования на данном и предыдущем шаге. Они в программе продемонстрированы функциональными блоками на вычитание, что показано на рисунке 7.

Через остальные блоки программируются остановки и разрешения интегрирования переменной.

Дифференциальная часть уравнения представлена на рисунке 8.

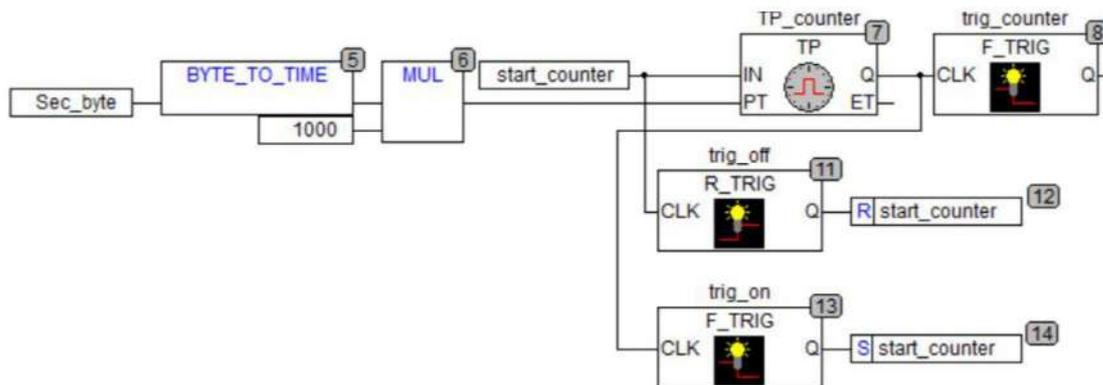


Рисунок 6. Часть управляющей программы для нахождения разницы между соседними рассогласованиями и таймера временных сигналов

Figure 6. Part of the control program for finding the difference between adjacent mismatches and the timer of time signals

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

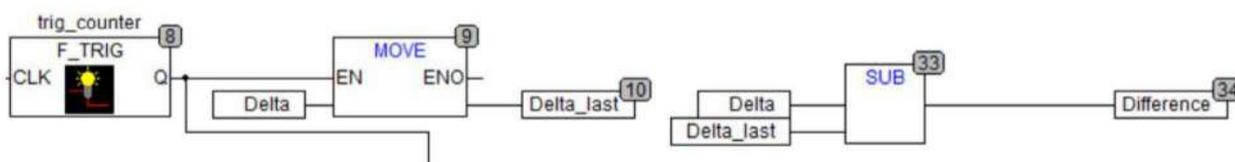


Рисунок 7. Часть программы с функциональными блоками рассогласования

Figure 7. Part of the program with functional blocks of mismatch

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

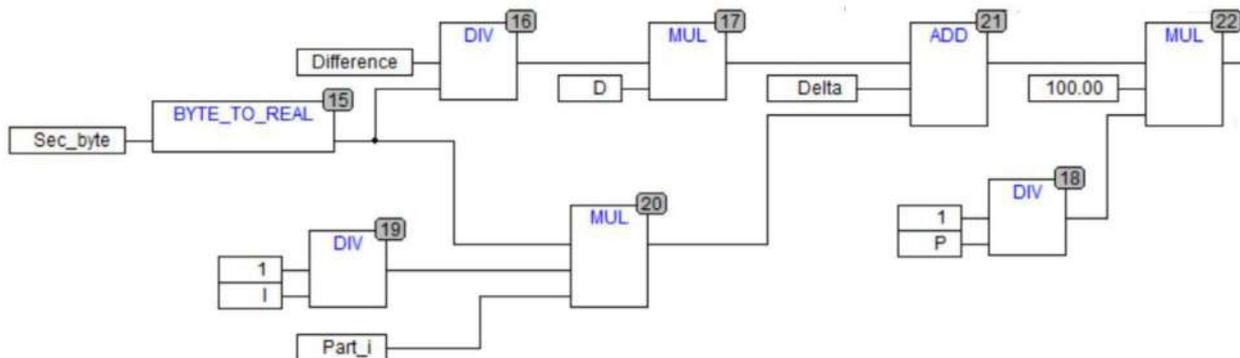


Рисунок 8. Дифференциальная часть управляющей программы

Figure 8. Differential part of the control program

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

2. Если рассогласование не находится в зоне нечувствительности, то вычисляется пропорциональная составляющая.

Для П-регулятора если рассогласование находится в зоне нечувствительности, то пропорциональная составляющая и выход равны нулю. В программе эту функцию выполняют блоки LT и GT, а

также блок LIMIT, представленные в части программы на рисунке 9. Поэтому при высоком значении параметра, интегральная часть отключается. Блок LIMIT в программе COESYS используется для ограничения значений. Если значение входного сигнала выше верхнего предела, то LIMIT «возвращает» max предел, а если меньше нижнего предела – min.

Блок преобразования сигнала LIN_TRAFO, представленный на рисунке 10, который линейно преобразует значения входных величин для линейного приближения выходного значения. С его помощью преобразуются значения с датчика давления в вольтах (вход IN) в значения давления в МПа (выход OUT).

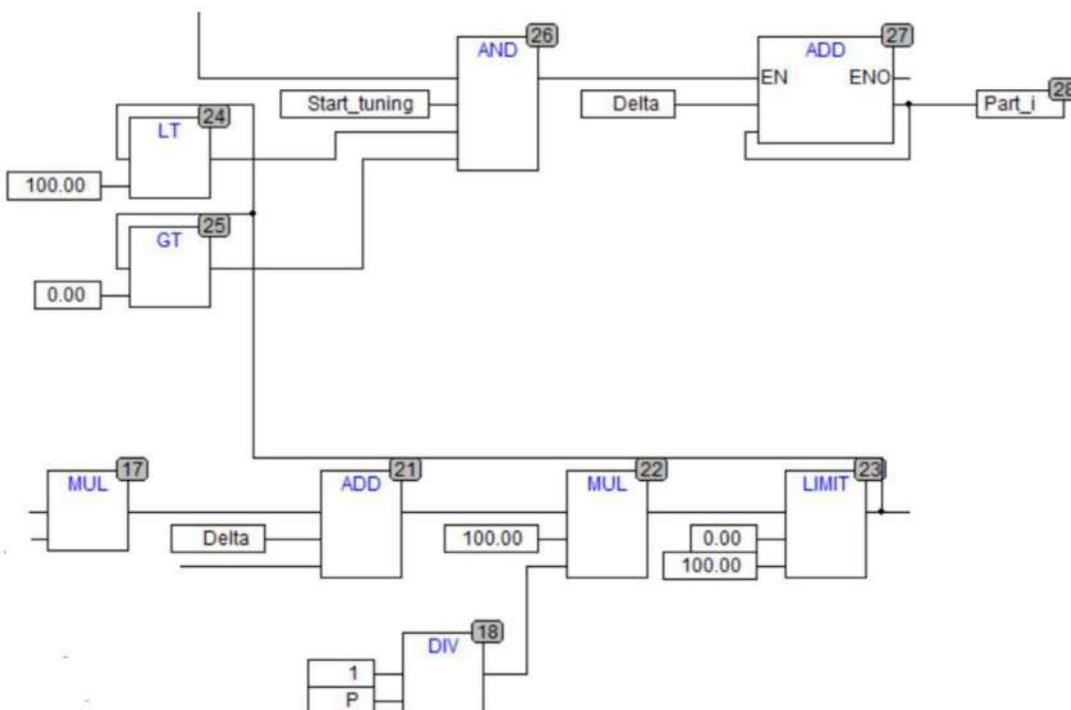


Рисунок 9. Часть программы, влияющая на работу интегральной части уравнения с зонами чувствительности

Figure 9. Part of the program that affects the operation of the integral part of the equation with sensitivity zones

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



Рисунок 10. Функциональный блок LIN_TRAFO в программе по преобразованию сигнала

Figure 10. Functional block LIN_TRAFO in the signal conversion program

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

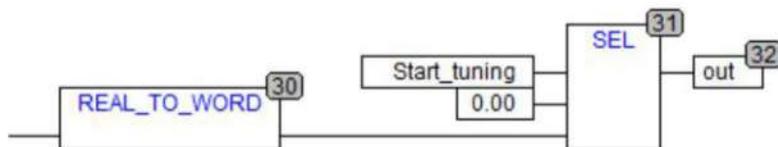


Рисунок 11. Функциональный блок SEL в управляющей программе

Figure 11. SEL functional block in the control program

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

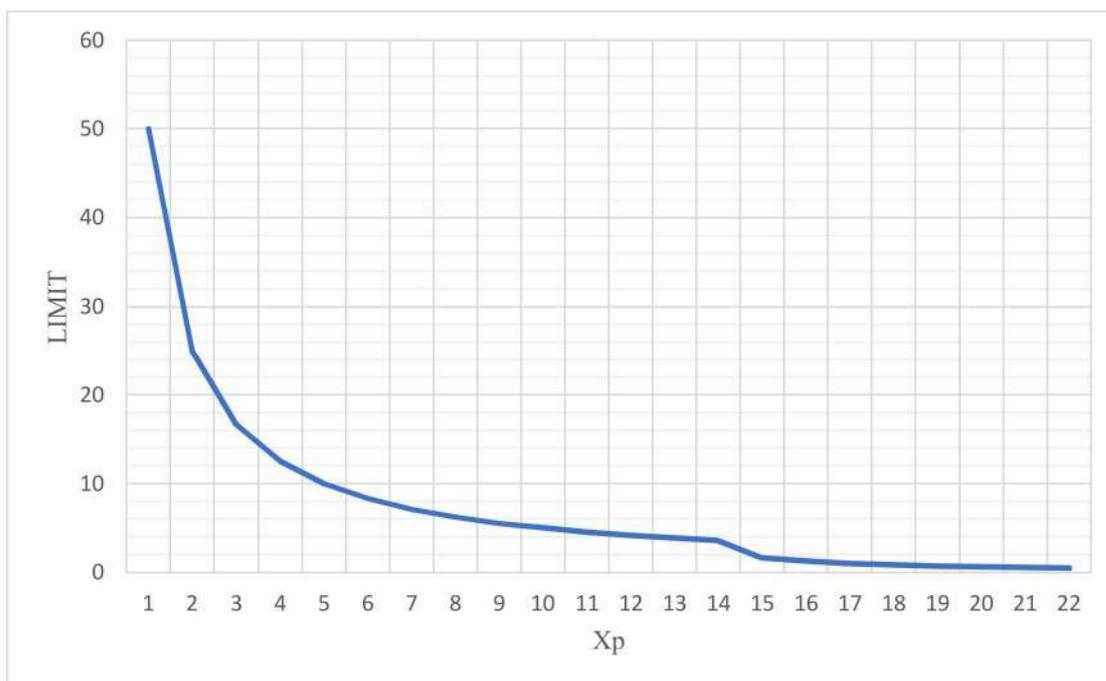


Рисунок 12. График зависимости отклонения от коэффициента X_p

Figure 12. Graph of the dependence of the deviation on the coefficient X_p

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

3. В зависимости от знака, запускается таймер открытия или закрытия дроссельного отверстия распределителя, где задание таймеров – модуль (абсолютное значение) Y_i . Если $Y_i = 0$, то таймеры не запускаются.

В качестве предохранителя будет играть функциональный блок SEL, представленный на рисунке 11. Эта функция, которая выбирает один из двух входов в зависимости от значения первого входа.

4. Выходы таймеров связаны выходными битами на открытие и закрытие канала распределителя.

Настройка коэффициентов ПИД-регулятора.

Подбор коэффициентов можно провести через метод Циглера–Никольса. Для этого необходимо обнулить все коэффициенты регулятора τ_d и τ_i , задать целевое значение регулируемого параметра (его взяли 25 МПа).

Постепенно увеличивая пропорциональный коэффициент X_p и контроль за реакцией системы, дал результаты, представленные на рис. 12 в виде

графика зависимости отклонения от подбора коэффициента X_p .

Как видно на графике при значении $X_p=14$ возникло резкое падение регулируемой величины. Зафиксировали это значение, а также период колебаний системы.

Максимальное количество корректировок коэффициентов ограничено 10. При настройке учитывается шаг корректировки коэффициентов.

Значение коэффициента интегральной компоненты $\frac{1}{\tau_i}$ должно быть мало по сравнению с X_p . В качестве начального значения рекомендуется брать число от 0,0001 до 0,01. При проведении эксперимента был найден подходящий коэффициент $\tau_i = 30$, при котором начинаются устойчивые незатухающие колебания.

На базе этих коэффициентов и ввели дифференциальную компоненту. Для начала установили небольшое значение (например, $\tau_d = 1$), а после подбирали такое, после которого проявились ошибочные колебания, вызванные малыми шумами. Это как раз получилось значение равное $\tau_d = 1$.

Обсуждение

ПИД-регулятор достаточно прост в реализации управления работой гидравлическим распределителем.

Найденные коэффициенты позволяют работать ПИД-регулятору со входными величинами (сигналом ошибки и значением выходного сигнала), принимающими непрерывные значения.

Таким образом, управляя ШИМ-сигналом по заданной программе, контроллер изменяет величину открытия дроссельного сечения золотникового пропорционального распределителя для управления давлением на выходе.

При использовании в системе П-компонента давление нарастает без ограничений и контроллер не успевает уменьшить выходной сигнал. При использовании ПИ-компонента в программе позволяет устранять систематические ошибки в расхождении, но при этом возникают колебания в контуре управления, это видно при запуске программы в режиме эмуляции. Программа записана в авторском исполнении. ПИД-регулятор уменьшает колебания системы и увеличивает скорость исправления

ошибки в гидросистеме, подводя текущие значения давления к уставке.

Для реализации настройки ПИД-регулятора частотного преобразователя для гидравлических систем лесных машин предполагается использовать эмпирический метод. На физической модели гидравлического манипулятора – это исследовательского комплекса «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ-ГПМ ФГБОУ ВО «ПГТУ» г. Йошкар-Ола. Из полученной модели ПИД-регулятора можно иметь уже представление о том, как система функционирует и как реагирует на изменения, чтобы манипуляции не носили хаотичный случайный

Заключение

Универсальность ПИД-регулятора дает широкий круг его применения в тех областях, в которых требуется автоматизированное управление.

Хотя существует множество других регуляторов, ПИД, в отличие от них, обладает стабильностью и адаптивностью к управляемой системе. Кроме этого, он имеет простую настройку и универсальность для любого изменяющегося процесса.

1) Для реализации настройки коэффициентов ПИД-регулятора частотного преобразователя гидравлических систем лесных машин эффективно применяются нейронные сети, которые для каждого набора сигналов вырабатывают коэффициенты регулятора.

2) Из полученной модели ПИД-регулятора можно иметь уже представление о том, как система функционирует и как реагирует на изменения, чтобы манипуляции не носили хаотичный случайный характер.

3) В качестве перспективы предполагается использовать исследовательский комплекс «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ-ГПМ ФГБОУ ВО «ПГТУ» г. Йошкар-Ола как физическую модель манипулятора, работающую на программе ПИД-регулирования и использующую нейронные сети.

Список литературы

1. Zishan F., Montoya, O.D.; Giral-Ramírez, D.A.; Molina-Cabrera, A. Efficient PID Control Design for Frequency Regulation in an Independent Microgrid Based on the Hybrid PSO-GSA Algorithm. *Electronics*, 2022; 11: 3886. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11233886>.
2. Barakat, M. Optimal design of fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-source interconnected power system. *Neural Comput & Applic*, 2022; 34: 18859–18880. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07470-4>.
3. Chotikunnan P., Chotikunnan R. Dual design PID controller for robotic manipulator application. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2023; 4 (1): 23-34. DOI: <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i1.16990>.
4. Almodaresi E., Bozorg M. Stable regions in the space of PID controller coefficients. *IET Control Theory & Applications*. 2017; 11: 1642–1647. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0685>.
5. Coskun M.Y., İtik M. Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system. *ISA transactions*, 2023; 139: 484–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.04.005>.
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Зеликов В.А., Колодий П.П. Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда. *Лесотехнический журнал*. – 2023; – Т.13. – №2 (50). – С. 158–178. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>. Режим доступа: <http://lestehjournal.ru/journal/2023/no-2-50/kompyuternoe-modelirovanie-rekuperativnogo-krivoshipnogo-mehanizma-povorota>
7. Палкин Г.А., Гайсин А.Ф. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – №23. – Т. 3. – С. 194-208. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208>. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-optimalnogo-metoda-upravleniya-elektroprivodami-nasosov-pervogo-podema-ekspluatiruemyh-v-usloviyah-otritsatelnyh>.
8. Баханович Г. и др. Электронное управление топливopодачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования. *Наука и техника*. – 2017. – Т. 1. – С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37>. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnoe-upravlenie-toplivopodachey-dizelnogo-dvigatelya-na-osnove-programmnogo-pid-regulirovaniya>.
9. Балобанов Е.Н., Емельянова М.С. Приборы в промышленности, неразрушающем контроле, здравоохранении и экологии. *Организационный комитет конференции*. – 2022. – С. 166. Режим доступа: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6xn0encez248277063.
10. Куликова И.В. Моделирование синтеза нечетких регуляторов типа Такаги – Сугено – Канга в некоторых системах управления. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. – 2021. – Т. 7. – №2 (26). – С. 147-169. DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169>. Режим доступа: https://vestnik.utmn.ru/energy/vypuski/2021-tom-7/2_26/1064300/.
11. Кожухова А.В., Невзорова М.Ю. Проектирование стенда для исследования частотного регулирования объемного насоса. *Символ науки*. – 2016. – №3 (3). – С. 53-56. Режим доступа: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6vqyos2zz576468933.
12. Труханов К.А. Цифровой ПИД-регулятор для пневмо-и гидросистем. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. – 2018. – Т. 3. – С. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66853>. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_35670015_10323769.pdf
13. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Идентификация нелинейной системы управления с ПИД-регулятором. *System identification and control problems. Sicpro'15*. – 2015. – С. 387–396. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23316545_72934853.pdf.

14. Алёхин М.В., Петросян А.Е., Шаховцев К.В. Промышленные манипуляционные роботы. Прорывные научные исследования как двигатель науки. – 2017. – С. 117-119. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_30663663_23533456.pdf.
15. Гулай В.А., Дубовик А.В., Богданова Е.А. Интеллектуальные, сенсорные и мехатронные системы. – 2024. Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/147397/Intellectualnye_sensornye_i_mekhatronnye_sistemy.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
16. Filo G. Artificial intelligence methods in hydraulic system design. *Energies*, 2023; 16 (8): 3320. DOI: <http://doi.org/10.3390/en16083320>.
17. Мирзалиев С.А., Шарипов К.Л. Моделирование функции гидропривода программой «LMS AMESIM». Материалы V Международной научно-практической конференции «Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве». – 2019. С. 308–311. Режим доступа: <https://ejournal.tsuc.uz/index.php/archive/article/view/3137>
18. Пастухов И.С., Целищев В.А. Гидросистема валочно-пакетирующей машины (харвестера), перспективы развития. Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. – 2020. – С. 201–206. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_44348266_38594338.pdf
19. Санталов А.А. Нейросетевая настройка адаптивного ПИД–регулятора мощности гидроагрегата. Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2021. – №3 (95). С. 30–34. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-nastroyka-adaptivnogo-pid-regulyatora-moschnosti-gidroagregata>
20. Фрянов В.Н., Павлова Л.Д. Имитационное моделирование и определение оптимальной траектории движения исполнительного органа роботизированного выемочного агрегата. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 202–210. Режим доступа: <http://www.jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/238>
21. 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 (Rostov-on-Don)*. – 2021. – Т. 21. – № 1. – С. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61>. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-gidravlicheskoj-sistemy-ustroystva-s-samoadaptatsiej-po-silovym-i-kinematicheskim-parametram-na-rabochem-organe>
22. Яковлев А.Ю., Красная А.А., Медведев С.Н. Применение Q-обучения для интеллектуального вывода стрелы манипулятора в заданное положение. Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. – 2021. – С. 1639–1647. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_46235784_68390633.pdf.
23. Thai N.H. et al. Trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a variable parameter PID controller. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2022; 11 (8): 614–621. DOI: <http://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.614-621>
24. Yang X. et al. Adaptive fuzzy PID control of high-speed on-off valve for position control system used in water hydraulic manipulators. *Fusion Engineering and Design*, 2024; 203: 114437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuseng-des.2024.114437>.
25. Хропаков Д.И. Моделирование многодвигательных гидросистем в программной среде Matlab-Simulink. Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2018. – С. 85–88. Режим доступа: <https://elib.gstu.by/handle/220612/19742>.
26. Голякевич С.А., Гороновский А.Р., Мохов С.П. Результаты имитационного моделирования работы гидравлической системы форвардера в MatLab/Simulink/Simscape. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. Минск: Труды БГТУ. – 2019. – № 1 (216). – С. 126–131. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-imitatsionnogo-modelirovaniya-raboty-gidravlicheskoj-sistemy-forvardera-v-matlab-simulink-simscape>

27. Попадьян А.Н. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора для управления следящим приводом с использованием программного пакета MATLAB SIMULINK. Морской вестник. – 2019. – № 3(71). – С. 93–96. EDN GHBFQI. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_39282319_87700478.pdf.
28. Измерители–регуляторы. Глоссарий (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://kurl.ru/xqroy>

References

1. Zishan F., Montoya, O.D.; Giral-Ramírez, D.A.; Molina-Cabrera, A. Efficient PID Control Design for Frequency Regulation in an Independent Microgrid Based on the Hybrid PSO-GSA Algorithm. *Electronics*. 2022; 11: 3886. <https://doi.org/10.3390/electronics11233886>.
2. Barakat M. Optimal design of fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-source interconnected power system. *Neural Comput & Applic*. 2022; 34: 18859–18880. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07470-4>.
3. Chotikunnan P., Chotikunnan R. Dual design PID controller for robotic manipulator application // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2023; 4 (1): 23-34. DOI: : <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i1.16990>.
4. Almodaresi E., Bozorg M. Stable regions in the space of PID controller coefficients. *IET Control Theory & Applications*. 2017; 11; 10: 1642-1647. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0685>.
5. Coskun M.Y., İtik M. Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system. *ISA transactions*. 2023; 139: 484–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.04.005>.
6. Posmet'ev V.I., Nikonov V. O., Posmet'ev V.V., Zelikov V.A., Kolodii P.V. Komp'yuternoe modelirovanie reku-perativnogo krivoshipnogo mekhanizma povorota kolonny manipulyatora lesovoznogo avtopoezda. [Computational modeling of a recuperative ship mechanism for turning a column manipulator of a timber truck]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry journal]*. 2023; 13; 2 (50): 158–178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>. URL: <http://lestehjournal.ru/journal/2023/no-2-50/kompyuternoe-modelirovanie-rekuperativnogo-krivoshipnogo-mehanizma-povorota>
7. Palkin G.A., Gaisin A.F. Issledovanie optimal'nogo metoda upravleniya elektroprivodami nasosov pervogo pod"ema, ekspluatiruemykh v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Study of the optimal method of controlling electric drives of first-stage pumps operated under subzero temperature conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Problems of energy.]*. 2021; 23(3): 194–208. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208>. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-optimalnogo-metoda-upravleniya-elektroprivodami-nasosov-pervogo-podema-ekspluatiruemyh-v-usloviyah-otrivalsatelnyh>
8. Bahanovich G. i drugie. Jelektronnoe upravlenie toplivopodachej dizel'nogo dvigatelja na osnove programmno PID-regulirovaniya [Electronic control of fuel supply of diesel engine based on software PID regulation]. *Nauka i tehnika [Science and Technology]*. 2017; 1: 28-37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37>. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnoe-upravlenie-toplivopodachej-dizelnogo-dvigatelya-na-osnove-programmnogo-pid-regulirovaniya>.
9. Balobanov E.N., Emel'janova M.S. Sekcija 3 [Section 3]. Pribory v promyshlennosti, nerazrushajushhem kontrole, zdavoohranenii i jekologii [Devices in industry, non-destructive testing, healthcare and ecology]. *Organizacionnyj komitet konferencii [Conference Organizing Committee]*. 2022; 166. (In Russ.). URL: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6xn0encez248277063.
10. Kulikova I.V. Modelirovanie sinteza nechetkih reguljatorov tipa Takagi – Sugeno – Kanga v nekotoryh sistemah upravlenija [Modeling the synthesis of fuzzy controllers of the Takagi-Suzeno-Kang type in some control systems]. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Tyumen State University]*. *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie [Physical and mathematical modeling]*. *Neft', gaz, jenergetika [Oil, gas, energy]*. 2021; 7; 2

- (26): 147–169. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169>. URL: https://vestnik.utmn.ru/energy/vypuski/2021-tom-7/2_26/1064300/
11. Kozhuhova A.V., Nevzorova M.Ju. Proektirovanie stenda dlja issledovanija chastotnogo regulirovanija obemnogo nasosa [Design of a test bench for studying frequency control of a volumetric pump]. Simvol nauki [Symbol of science]. 2016; 3 (3): 53–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66853>. URL: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6vqyos2zz576468933
 12. Truhanov K.A. Cifrovoj PID–reguljator dlja pnevmo- i gidrosistem. Izvestija Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta MAMI [Digital PID controller for pneumatic and hydraulic systems. News of the Moscow State Technical University MAMI]. 2018; 3: 65–75. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66853>. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_35670015_10323769.pdf
 13. Prokop'ev A.P., Ivanchura V.I., Emel'janov R.T. Identifikacija nelinejnoj sistemy upravlenija s PID-reguljatorom [Identification of a nonlinear control system with a PID controller]. System identification and control problems. Siepro'15. 2015; 387–396. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23316545_72934853.pdf.
 14. Aljohin M.V., Petrosjan A.E., Shahovcev K.V. Promyšlennye manipuljacionnye roboty .Proryvnye nauchnye issledovanija kak dvigatel' nauki [Industrial manipulation robots. Breakthrough scientific research as the engine of science]. 2017; 117–119. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30663663_23533456.pdf.
 15. Gulaj V.A., Dubovik A.V., Bogdanova E.A. Intellekтуал'nye, sensornye i mehatronnye sistemy [Intelligent, sensory and mechatronic systems]. 2024 (In Russ). URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/147397/Intellektualnye_sensornye_i_mekhatronnye_sistemy.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
 16. Filo G. Artificial intelligence methods in hydraulic system design //Energies. 2023; 16(8): 3320. DOI: <http://doi.org/10.3390/en16083320>.
 17. Mirzaliev S.A., Sharipov K.L. Modelirovanie funkčii gidroprivoda programnoj " LMS AMESIM"[Modeling of hydraulic drive functions using the LMS AMESIM program.]. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii " Metody i tehnologii v selekcii rastenij i rastenievodstve" [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Methods and Technologies in Plant Breeding and Plant Growing"]. 2019; 308-311. (In Russ). URL: <https://ejournal.tsue.uz/index.php/archive/article/view/3137>.
 18. Pastuhov I.S., Celishhev V.A. Gidrosistema valочно-пакетирующей машины (harvestera), perspektivy razvitija. Gidravličeskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika [Hydraulic system of feller-buncher (harvester), development prospects. Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumatic automation]. 2020; 201-206. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44348266_38594338.pdf.
 19. Santalov A.A. Nejrosetevaja nastrojka adaptivnogo PID–reguljatora moshhnosti gidroagregata. Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Neural network tuning of adaptive PID-controller of hydroelectric power unit. Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2021; 3 (95): 30–34. (In Russ). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-nastroyka-adaptivnogo-pid-regulyatora-moshhnosti-gidroagregata>.
 20. Frjanov V.N., Pavlova L.D. Imitacionnoe modelirovanie i opredelenie optimal'noj traektorii dvizhenija ispolnitel'nogo organa robotizirovannogo vyemochnogo agregata [Simulation modeling and determination of the optimal trajectory of movement of the executive body of a robotic mining unit]. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk [Fundamental and applied issues of mining sciences]. 2016; 3(2): 202–210. (In Russ). URL: <http://www.jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/238>.
 21. Hinikadze T.A., Rybak A.T., Popikov P.I. Modelirovanie gidravličeskoj sistemy ustrojstva s samoadaptaciej po silovym i kinematičeskim parametram na rabochem organe [Modeling of a hydraulic system of a device with self-adaptation according to power and kinematic parameters on the working element]. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2021; 21(1): 55-61. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61>. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-gidravličeskoj-sistemy-ustrojstva-s-samoadaptatsiej-po-silovym-i-kinematičeskim-parametram-na-rabochem-organe>.

22. Jakovlev A.Ju., Krasnaja A.A., Medvedev S.N. Primenenie Q-obuchenija dlja intellektual'nogo vyvoda strely manipulatora v zadannoe polozhenie [Using K-learning to intelligently position a manipulator boom]. Aktual'nye problemy prikladnoj matematiki, informatiki i mehaniki [Current issues in applied mathematics, computer science and mechanics]. 2021; 1639–1647. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46235784_68390633.pdf.
23. Thai N.H. et al. Trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a variable parameter PID controller. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022; 11(8): 614–621. DOI: <http://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.614-621>.
24. Yang X. et al. Adaptive fuzzy PID control of high-speed on-off valve for position control system used in water hydraulic manipulators. Fusion Engineering and Design. 2024; 203: 114437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114437>.
25. Hropakov D.I. Modelirovanie mnogodvigatel'nyh gidrosistem v programmnoj srede Matlab-Simulink [Modeling of multi-engine hydraulic systems in the Matlab-Citylink software environment]. Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroenija, jenergetiki i upravlenija: materialy XVIII Mezhdunar. nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh [Research and development in the field of mechanical engineering, energy engineering and management: materials of the XVIII International scientific-technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Gomel': Gomelevskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet [Gomel State Technological University], 2018; 85–88. (In Russ). URL: <https://elib.gstu.by/handle/220612/19742>.
26. Goljakevich S.A., Goronovskij A.R., Mohov S.P. Rezul'taty imitacionnogo modelirovanija raboty gidravlicheskoj sistemy forvardera v MatLab/Simulink/Simscape [Results of simulation modeling of the forwarder hydraulic system operation in MatLab/Cimulink/Simscape]. Serija 1 [Episode 1]: Lesnoe hozjajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovljaemyh resursov [Forestry, nature management and processing of renewable resources]. Minsk: Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta [Proceedings of the Belarusian State Technological University]. 2019; 1 (216):126–131. (In Russ). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-imitatsionnogo-modelirovaniya-raboty-gidravlicheskoj-sistemy-forvardera-v-matlab-simulink-simscape>.
27. Popad'in A.N. Avtomatizirovannaja nastrojka PID-reguljatora dlja upravlenija sledjashhim privodom s ispol'zovaniem programmnoho paketa MATLAB SIMULINK [Automated tuning of PID controller for control of servo drive using MATLAB SIMULINK software package]. Morskoy vestnik [Marine Herald]. 2019; 3(71): 93–96. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39282319_87700478.pdf.
28. Izmeriteli–reguljatory. Glossarij (Jelektronnyj resurs) [Measuring instruments-regulators. Glossary (Electronic resource)]. (In Russ)]. URL: <https://kurl.ru/xqpoy>

Сведения об авторах

Головина Елена Витальевна – старший преподаватель, аспирант ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д.3, г. Йошкар-Ола, 424000, Российская Федерация, e-mail: GolovinaEV@volgatech.net.

Павлов Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедры транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д.3, г. Йошкар-Ола, 424000, Российская Федерация, e-mail: PavlovAI@volgatech.net.

Information about the authors

Elena V. Golovina – Senior Lecturer, Postgraduate Student, Volga Region State Technological University, Lenin Square, 3, Yoshkar-Ola, Russia, 424000, Russian Federation, e-mail: GolovinaEV@volgatech.net.

Aleksandr I. Pavlov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport and Technological Machines, Volga Region State Technological University, Lenin Square, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation, e-mail: PavlovAI@volgatech.net.

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12>

УДК 630.3:621.22:681.3



Моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора манипулятора лесных машин

Михаил В. Драпалюк, michael1@yandex.ru, 0000-0002-8029-2706

Алексей А. Платонов, paa7@rambler.ru 0000-0003-4114-4636

Петр И. Попиков, porikovpetr@yandex.ru 0000-0002-6348-8934

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

Аннотация

В работе проводится исследование и моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора, используемого в манипуляторах лесохозяйственных машин. Манипуляторные установки этих машин играют ключевую роль в выполнении технологических операций при подготовке площадей для выращивания лесных культур, а также при их последующем уходе. Для повышения эффективности выполняемых операций, таких как срезание или удаление нежелательной древесно-кустарниковой растительности, удаление камней, валунов и других препятствий, актуальным направлением является модернизация манипуляторов. Одним из перспективных способов снижения энергоемкости рабочего процесса является внедрение высокоэффективных вибрационных воздействий, прикладываемых к рабочим органам манипулятора. Анализ современных исследований в области гидравлических пульсаторов показал, что разработка новых конструкций роторных пульсаторов может существенно улучшить показатели эффективности. В ходе работы установлено, что эксплуатационные параметры гидравлического пульсатора, такие как диаметр золотникового вала и площадь отверстия для перетекания рабочей жидкости, зависят от максимального угла поворота оси золотникового вала, равного $22^{\circ}30'$. Определены допустимые зоны вариации геометрических параметров указанного отверстия. Исследования показали, что изменение площади отверстия для перетекания жидкости во времени оказывает непосредственное влияние на расход рабочей жидкости через штоковую или поршневую полости гидроцилиндра. Наибольшее время перетекания жидкости (1–1,6 с) наблюдается при частотах вращения золотникового вала 10–20 об/мин. Установлено, что для отверстий диаметром 5 мм в зоне малых частот вращения время отсутствия перетока жидкости возрастает на 0,18–0,36 с. Для гидравлических рукавов высокого давления с внутренними диаметрами 8–16 мм, наиболее часто применяемых в лесохозяйственной технике, максимальный расход рабочей жидкости составляет 0,00101 м³/с (1,01 л/с). Полученные результаты имеют практическое значение для совершенствования конструкций гидравлических пульсаторов и повышения эффективности манипуляторов лесных машин.

Ключевые слова: *манипулятор, гидравлический пульсатор, золотниковый вал, гидроцилиндр, частота вращения, рабочая жидкость, расход.*

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: Драпалюк, М. В. Моделирование рабочего процесса гидравлического пульсатора манипулятора лесных машин / М. В. Драпалюк, А. А. Платонов, П. И. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 191–206. – Библиогр.: с. 204–206 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12>.

Поступила 03.12.2024. Пересмотрена 26.05.2025. Принята 05.06.2025. Опубликовано онлайн 26.06.2025.

Modelling of the working process of the hydraulic pulsator of forest machine manipulator

Mikhail V. Drapalyuk, michael1@yandex.ru,  0000-0002-8029-2706

Alexey A. Platonov,  paa7@rambler.ru  0000-0003-4114-4636

Petr I. Popikov, popikovpetr@yandex.ru  0000-0002-6348-8934

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

Abstract

The article studies and simulates of the working process of the hydraulic pulsator used in the manipulators of forestry machines. Manipulator units of these machines play a key role in the performance of technological operations in the preparation of areas for growing forest crops, as well as in their subsequent maintenance. To increase the efficiency of operations such as cutting or removing unwanted tree and shrub vegetation, removing stones, boulders and other obstacles, the modernization of manipulators is an actual direction. One of the promising ways to reduce the energy intensity of the working process is the introduction of highly effective vibration effects applied to the working bodies of the manipulator. The analysis of modern research in the field of hydraulic pulsators has shown that the development of new designs of rotary pulsators can significantly improve the performance indicators. In the course of the work, it has been revealed that the operating parameters of the hydraulic pulsator, such as the diameter of the spool shaft and the area of the working fluid overflow hole, depend on the maximum angle of rotation of the spool shaft axis equal to $22^{\circ}30'$. The permissible zones of variation of geometrical parameters of the specified orifice are determined. Researches have shown, that change of area of an aperture for a fluid flow in time has a direct influence on the working fluid flow rate through the rod or piston cavity of the hydraulic cylinder. The greatest time of liquid overflow (1-1.6 s) is observed at rotational speeds of the spool shaft 10-20 rpm. It is established that for holes with diameter of 5 mm in the zone of small rotational speeds the time of absence of liquid overflow increases by 0.18-0.36 s. For high-pressure hydraulic hoses with internal diameters of 8-16 mm, most often used in forestry machinery, the maximum flow rate of working fluid is 0.00101 m³/s (1.01 l/s). The results are of practical importance for improving the designs of hydraulic pulsators and increasing the efficiency of forest machine manipulators.

Keywords: *manipulator, hydraulic pulsator, spool shaft, hydraulic cylinder, rotation frequency, working fluid, flow rate*

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: Drapalyuk M. V., Platonov A. A., Popikov P. I. (2025). Modeling of the working process of a hydraulic pulsator manipulator of forest machines. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 191-206 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/12>.

Received 03.12.2024. *Revised* 26.05.2025. *Accepted* 05.06. 2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

В процессе выполнения работ по подготовке к выращиванию лесных культур, а также их дальнейшему уходу, значительную роль играет применение лесохозяйственной техники, оснащённой манипуляторными установками (Zanchi G., et al., 2021). Такие установки позволяют эффективно выполнять широкий спектр задач, включая расчистку территорий от нежелательной древесной, кустарниковой и травянистой растительности с использованием кусторезов, мульчеров и корчевальных головок, а также удаление остатков растительности, таких как пни, с помощью фрез или корчевателей. Кроме того, манипуляторы с активными рабочими органами применяются для обработки корневых систем и удаления посторонних объектов, таких как камни и валуны.

Развитие и модернизация манипуляторов, которые классифицируются по степени подвижности, конструктивным особенностям, типу управления, назначению и специализации, способствует улучшению технологических операций, связанных с лесохозяйственной деятельностью. Современные требования к качеству выполнения таких операций требуют внедрения инновационных инженерных решений, включая проектирование новых механических конструкций манипуляторов и их интеграцию с гидравлическими, пневматическими и электрическими элементами. Эти разработки позволяют добиваться эффективного использования манипуляторных систем в реальных производственных условиях.

Особое внимание в современной отечественной и мировой технической литературе уделяется разработке высокоэффективных вибрационных воздействий, которые прикладываются к рабочему органу, размещённому на конце стрелы или рукояти манипулятора, либо к самой стреле или рукояти. Вибрационные воздействия позволяют снизить нагрузку на элементы манипуляторной системы в процессе выполнения технологических операций и одновременно увеличить эффективность и качество выполняемых работ.

Создание таких вибрационных воздействий возможно, в частности, за счёт использования гидравлических пульсаторов в гидрокинематической схеме манипулятора. Эти устройства обеспечивают

периодическую генерацию импульсов давления на штоке гидроцилиндра манипуляторной системы. Например, в работе M. Krüger (2025) был представлен грейферный захват с гидравлическим вибрационным приводом, который в процессе работы совершает вынужденные колебания. Авторы предложили математические зависимости для анализа колебаний рабочего органа, подвешенного на тросе, и динамического отклика гидравлического привода.

Современные исследования также направлены на совершенствование конструкций манипуляторов, в том числе их гидроприводов. В частности, работа В.И. Посметьева и соавторов (2024) посвящена анализу механизмов рекуперации энергии при повороте колонны гидроманипулятора лесных машин с оптимизацией геометрических параметров кривошипно-поворотного механизма. С.Е. Анисимов и соавторы (2024) разработали и исследовали конструкцию многозвенного комбинированного манипулятора с гидравлическим приводом, обеспечивающим выдвигание рабочего органа на расстояние до 18 м. В свою очередь, G. Yang и соавторы (2020) предложили метод управления манипулятором, позволяющий достигать высокой точности управления в условиях неопределённости динамики и изменчивости состояния системы.

Методы оптимизации работы манипуляторов также направлены на улучшение их траектории. Так, в работе I. Saoud и соавторов (2024) использован модифицированный профиль синусоидального рывка, минимизирующий время выполнения траектории манипулятора и обеспечивающий плавность его движения.

Настоящая работа направлена на моделирование и изучение рабочего процесса гидравлического пульсатора, используемого в манипуляторных системах лесных машин. Такое исследование имеет целью улучшение эксплуатационных характеристик манипуляторов и качества выполняемых лесохозяйственных операций за счёт внедрения инновационных технических решений.

Современные исследования, направленные на совершенствование рабочих процессов манипуляторов лесных машин, уделяют особое внимание моделированию их динамических характеристик,

исследованию гидроприводов и развитию конструкций, обеспечивающих повышение эффективности операций.

Так, в работе И.Д. Евсикова и др. (2023) была представлена математическая модель поворота стрелы манипулятора лесной машины с учетом расхода рабочей жидкости, включая анализ динамики системы гидропривода и давления в гидравлической магистрали при реализации рабочего процесса. Особое внимание уделено влиянию этих параметров на общее поведение манипулятора.

Коллективом авторов под руководством проф. О.Р. Дорняка (2024) предложена математическая модель, позволяющая исследовать динамическое нагружение элементов гидросистемы манипулятора. В центре их работы находились пульсации давления, вызывающие высокочастотные колебания элементов гидроагрегатов с большой амплитудой, что оказывает влияние на эксплуатационную надежность механизмов.

Метод управления движением гидравлических манипуляторов был предложен R. Ding и соавторами (2023). Их высокоточный алгоритм основан на принципах управления виртуальной декомпозицией. Полученные результаты демонстрируют минимальную погрешность в позиционировании манипулятора (менее 50 мм), что подчеркивает перспективность применения подобного метода для повышения точности управления.

Методологические подходы к моделированию динамических характеристик манипуляторов были также рассмотрены в исследованиях Z. Liu и др. (2022) 12 и P. Rao и др. (2023). Проведенные ими расчёты на основе метода конечных элементов подтверждают возможность переноса полученных результатов на другие модели манипуляторов, а также интеграции данных исследований в виртуальной среде для упрощения сложных вычислений.

Работа P. Pietruś и P. Gierlak (2023) направлена на анализ частотных характеристик манипуляторов. С помощью численного моделирования был определён спектр вибраций звеньев манипулятора, проведены испытания различных конфигураций, что позволило сформировать карту резонансных частот для оптимизации конструктивных параметров.

Особое внимание уделяется совершенствованию конструкций гидравлических пульсаторов, являющихся ключевыми элементами системы создания импульсов давления. Так, в исследовании N. Tuong и соавторов (2024) с использованием программного обеспечения Matlab Simulink и инструмента Simscape Hydraulic была создана гидравлическая схема пульсатора, которая позволила выполнить проверку расчетных характеристик системы. Расчёты рамы манипулятора выполнялись методом конечных элементов с использованием Altair Simlab, что позволило определить наиболее оптимальные конструктивные решения.

Методика проектного расчета конструкции гидроимпульсного пульсатора была предложена R. Obertyukh и др. (2024). Разработанная модель с клапанным генератором импульсов давления параметрического типа позволила определить энергетические и мощностные характеристики пульсатора. Однако исследователи отмечают отсутствие общепринятой методики проектирования гидроимпульсных пульсаторов, что подтверждает необходимость проведения дальнейших оригинальных исследований в данной области.

Также в работе L. Zaripova и соавторов (2024) был исследован вибрационный пульсатор с гидромеханическим принципом действия, в конструкции которого применён подпружиненный поворотный клапан. Определены параметры устойчивой работы пульсатора, среди которых расход жидкости (0,012 м³/с), амплитуда колебаний корпуса пульсатора (300 мкм), амплитуда колебаний давления рабочей жидкости (1,8 МПа) при частоте 8 Гц.

Таким образом, анализ современных исследований демонстрирует широкий спектр направлений, связанных с математическим моделированием, оптимизацией конструкций и совершенствованием методов управления манипуляторами и их элементами. Полученные результаты служат основой для разработки более эффективных и надежных конструкций манипуляторов лесных машин.

В исследовании N. Mikheev (2017) представлен подход к созданию и управлению синусоидальным пульсирующим течением в канале с использованием пульсатора, оснащённого профилированным вращающимся клапаном. Данный конструктивный

элемент обеспечивал изменение площади поперечного сечения канала в соответствии с гармоническим законом. На основе решения нестационарного уравнения Бернулли и численных расчётов, основанных на уравнениях URANS, была проведена оценка влияния инерционных сил на зависимость изменения средней скорости потока от фазы пульсаций в рабочей области экспериментального пульсатора.

Аналогичная концепция была рассмотрена в работе A. Goltzman и соавторов (2019), где создана экспериментальная система, включающая пульсатор с профилированной вращающейся заслонкой, изменяющей площадь проходного сечения канала пульсатора в соответствии с гармоническим законом. Подчёркнуто, что конструкция пульсатора должна позволять реализовывать широкий спектр пульсационных режимов течения, что повышает её универсальность.

Ключевым направлением исследования вибрационных систем управляемого воздействия представляется работа Q. Ren и др. (2021), посвящённая разработке и параметрическому анализу вибрационной системы с гидравлическим ударным роторным вибратором. Авторами предложена оригинальная гидравлическая система возбуждения колебаний, управляемая роторным ударным вибратором. Кроме того, была смоделирована система с учётом влияния трубопровода, результаты которой сравнивались с моделью, пренебрегающей такими эффектами.

Исследование G. Zhou и др. (2024) было сосредоточено на изучении характеристик вибрационной системы, управляемой поворотным клапаном рабочего органа. В ходе анализа рассматривались эффекты влияния нескольких параметров: входного давления рабочей жидкости, скорости приводного двигателя, а также объёма насоса подачи масла. Авторами было установлено, что оптимизация таких параметров, как увеличение входного давления и снижение скорости приводного двигателя, позволяет улучшить вибрационные характеристики системы, что демонстрирует практическую применимость предложенных решений.

Для гидрокинематических систем манипуляторов, использующих несколько (в частности, два)

параллельно работающих гидроцилиндра, коллективом авторов, представленным в работе Li J. et al., разработана новая гидравлическая схема, обеспечивающая надёжную и устойчивую синхронизацию работы пульсаторов. Математическая модель, созданная для анализа точности синхронизации, учитывает такие аспекты, как дисбаланс масс пульсаторов, их эксцентриситеты и коэффициенты вязкого затухания.

Проведённый анализ литературных источников и современных исследований показал, что перспективным направлением является разработка новых конструктивных решений роторных гидравлических пульсаторов с использованием методов математического моделирования. Эти подходы должны учитывать факторы, влияющие на эффективность функционирования пульсаторов, включая параметры площади поперечного сечения каналов для перетекания рабочей жидкости.

Моделирование позволит определить оптимальные энергетические, мощностные и геометрические параметры пульсаторов, включая амплитуду колебаний рабочего органа, расход жидкости и перемещения штока гидроцилиндра. Также важным является учёт характеристик трубопроводов, обеспечивающих подачу и отвод рабочей жидкости.

Целью настоящего исследования является повышение эффективности технологических операций при подготовке к выращиванию лесных культур и их последующему уходу за счёт обоснования оптимальных параметров функционирования гидравлического пульсатора, используемого в конструкции манипуляторов лесохозяйственных машин. Решение данной задачи осуществляется посредством разработки математической и имитационной моделей рабочего процесса пульсатора, что позволит определить наиболее эффективные параметры его работы.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели проводится разработка математической модели, учитывающей следующие аспекты:

- конструктивные особенности гидравлического пульсатора, включая геометрию каналов и параметры движущихся элементов;

- характеристики гидравлического цилиндра, в конструкции которого применяются пульсаторные системы;

- свойства и параметры гидравлических рукавов высокого давления, обеспечивающих подачу и отвод рабочей жидкости;

- технологические режимы функционирования системы, включая учет динамических процессов перетекания рабочей жидкости, влияющих на её энергоёмкость.

Разрабатываемая математическая модель позволяет моделировать и анализировать влияние указанных факторов на ключевые гидрокинематические характеристики рабочего процесса гидравлического пульсатора, таких как частота и амплитуда создаваемых колебаний, расход жидкости, а также энергоэффективность системы. Это обеспечивает возможность выбора оптимальных конструктивных и технологических параметров, минимизирующих потери рабочей жидкости и повышающих производительность механизма.

Таким образом, данное исследование ориентировано на совершенствование рабочих процессов манипуляторов лесной техники, что имеет прямое прикладное значение для повышения эффективности лесохозяйственных операций.

Материалы и методы

Методология исследования основывается на разработке математической модели, которая учитывает конструктивные параметры гидравлического пульсатора, гидравлического цилиндра, а также соединяющих их рукавов высокого давления. Дополнительно учитываются технологические режимы работы системы с сосредоточением внимания на факторах, ограничивающих объём перетекания рабочей жидкости и её пульсационные характеристики.

Объектом исследования является гидравлический пульсатор, применяемый в манипуляторных системах лесохозяйственных машин. Предметом исследования определены гидрокинематические характеристики процесса формирования импульсов рабочей жидкости, влияющих на шток гидроцилиндра манипулятора. Особое внимание уделено взаимодействию конструктивных параметров гидравлического пульсатора и рабочих условий системы, а

также их влиянию на эффективность выполнения технологических операций.

Методы сбора данных

Для проведения предварительного анализа работоспособности и эффективности исследуемого гидравлического пульсатора использовались методы математического и компьютерного моделирования. Это позволило детально выстроить и изучить динамическую модель и разработать рекомендации по её оптимизации. Формируемая математическая модель гидравлического пульсатора предоставила следующие возможности:

1. Проведение анализа влияния технологических характеристик пульсатора на потребление рабочей жидкости гидроцилиндром манипулятора.

2. Определение допустимых конструктивных параметров пульсатора, учитывая широкий спектр рабочих условий и режимов эксплуатации.

3. Выявление оптимальных рабочих и конструктивных характеристик пульсатора для обеспечения его эффективности и надёжности.

4. Подтверждение работоспособности и эффективности исследуемого устройства на этапе разработки.

Для построения модели использовались как аналитические зависимости, описывающие гидродинамические и механические процессы в системе, так и численные методы решения уравнений, фиксирующих взаимодействие компонентов гидравлического манипулятора. Среди ключевых параметров, анализируемых в модели, особую значимость имели частота и амплитуда импульсов давления, объёмы перетекания рабочей жидкости и характеристики трубопроводов высокого давления.

Статистический анализ данных

Статистическая обработка результатов, полученных в ходе численного моделирования, осуществлялась с использованием лицензионного программного обеспечения Statistica 6.0. Это позволило оценить достоверность и устойчивость выявленных зависимостей, а также сформировать обоснованные рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции и режимов работы исследуемой системы.

Расчётный этап включал оценку следующих показателей:

- Расход рабочей жидкости в различных режимах работы пульсатора.
- Взаимосвязь частоты колебаний с амплитудой перемещений штока гидроцилиндра.
- Оптимальные размеры отверстий пульсатора для обеспечения требуемого уровня импульса давления.
- Влияние внешних технологических факторов (гидростатическое давление, вязкость рабочей жидкости) на рабочие характеристики системы.

Результаты

Формирование визуального образа моделируемого гидравлического пульсатора лесного манипулятора, основные отличительные признаки которого соответствовали патенту на изобретение № 2433001, осуществлялось посредством отечественной системы автоматизированного проектирования Компас.

При моделировании гидравлический пульсатор рассматривался как элемент гидрокинематического узла лесохозяйственной машины, обладающий такими целеполагающими компонентами, как золотниковый вал 1 диаметром $d_{зол}$ с отверстием для перетекания рабочей жидкости диаметром $d_{к.зол}$ и корпус пульсатора 2 (рис. 1) с отверстием 3 для перетекания рабочей жидкости диаметром $d_{к.кр}$. В процессе моделирования гидравлического пульсатора из его конструкции были исключены элементы, не оказывающие существенного влияния на цели моделирования. В частности, конструкция пульсатора не включала такие элементы, как соединения привода движения, обеспечивающие передачу вращения золотниковому валу (например, шлицевые или шпоночные соединения), а также элементы крепления, такие как резьбовые соединения, фиксирующие подводящие и отводящие гидравлические рукава высокого давления на корпусе пульсатора. Однако в ходе моделирования принималась во внимание геометрия системы, в частности взаимная перпендикулярность осей отверстий, обеспечивающих ввод и вывод рабочей

жидкости, которая распределяется между поршневой и штоковой полостями гидроцилиндра. Такой подход позволил сосредоточиться на исследовании ключевых гидрокинематических характеристик рабочего процесса, исключив влияние второстепенных факторов.

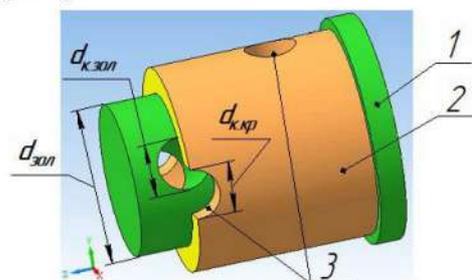


Рисунок 1. Модель гидравлического пульсатора лесного манипулятора

Источник: собственная композиция авторов

Figure 1. Model of the hydraulic pulsator of the forest manipulator

Source: author's composition

В качестве основы принималось допущение о непрерывном и равномерном вращении золотникового вала с угловой скоростью ω (рад/с), во время которого рабочая жидкость, подводящая к корпусу пульсатора и перетекающая через золотниковый вал, обеспечивает попеременное наполнение собой поршневой или штоковой полостей гидроцилиндра лесохозяйственной машины. При этом взаимосвязь принимаемых величин диаметров $d_{к.зол}$ и $d_{зол}$ создаёт условия для формирования предельного угла $\varphi_{зол}^{np}$, при котором начинается и завершается перетекание жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора: $\varphi_{зол}^{np} = \arcsin(d_{к.зол} / d_{зол})$, подчиняясь соотношению $d_{к.зол} \leq d_{зол} \cdot \sin 22^{\circ}30'$ (мм).

Вращающийся золотниковый вал и статичный корпус пульсатора являются причиной непрерывного изменения во времени площади S_0 (мм²) отверстия перетекания жидкости ($S_0 = f(\varphi_{зол})$, где $\varphi_{зол}$ – угол поворота оси отверстия золотникового вала в момент времени t):

$$S_0 = \frac{d_{к.зол}^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \left(180 - 2 \cdot \arcsin \frac{d_{к.зол} + d_{зол} \cdot \sin \left(\varphi_{зол} t - \arcsin \frac{d_{к.зол}}{d_{зол}} \right)}{2 \cdot d_{к.зол}} \right)}{180} - \sin \left(180 - 2 \cdot \arcsin \frac{d_{к.зол} + d_{зол} \cdot \sin \left(\varphi_{зол} t - \arcsin \frac{d_{к.зол}}{d_{зол}} \right)}{2 \cdot d_{к.зол}} \right) \right) \quad (1)$$

При формировании графической зависимости $S_0 = f(\varphi_{зол})$ её отличительными элементами (1) являются время $t_{\partial p}$ (с) перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора (2), а также время $t_{выд}$ (с) выдержки (отсутствия) указанного перетекания.

$$\begin{cases} t_{\partial p} = \frac{4 \cdot \varphi_{зол}^{np}}{\omega_{зол}} = \frac{2 \cdot \varphi_{зол}^{np}}{3 \cdot n_{зол}} \\ t_{выд} = \frac{180 - 4 \cdot \varphi_{зол}^{np}}{\omega_{зол}} = \frac{1}{n_{зол}} \cdot \left(30 - \frac{2}{3} \cdot \varphi_{зол}^{np} \right) \end{cases} \quad (2)$$

где $n_{зол}$ – частота вращения золотникового вала пульсатора, об/мин

К отличительным характеристикам системы относится суммарное время поворота золотникового вала, в течение которого оси отверстий дважды обеспечивают пропускание рабочей жидкости в гидроцилиндр манипулятора лесохозяйственной машины. Это позволяет реализовать два импульса управляющего воздействия на шток гидроцилиндра (рис. 2).

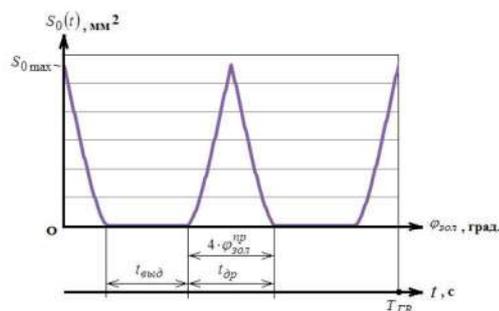


Рисунок 2. Зависимость площади отверстия перетекания жидкости от угла поворота вала
Источник: собственная композиция авторов
Figure 2. Dependence of the area of the liquid flow hole on the angle of rotation of the shaft

Source: author's composition

Учитывая, что в процессе перетекания рабочая жидкость полностью направляется в штоковую или поршневую полости гидроцилиндра, её расход (в $\text{м}^3/\text{с}$), который также зависит от скорости потока рабочей жидкости в гидравлических рукавах высокого давления (в $\text{м}/\text{с}$), может быть определён с использованием зависимости (3):

$$Q_{nm(um)} = \frac{3 \cdot n_{30l} \cdot v_{max}}{2 \cdot 10^6 \cdot \varphi_{30l}^{np}} \times$$

$$\times \frac{d \frac{d_{к.30l}^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 180 - 2 \cdot \arcsin \frac{d_{к.30l} + d_{30l} \cdot \sin \left(\varphi_{30l} t - \arcsin \frac{d_{к.30l}}{d_{30l}} \right)}{2 \cdot d_{к.30l}} \right)}{180}}{dt} - \sin \left(\frac{d_{к.30l} + d_{30l} \cdot \sin \left(\varphi_{30l} t - \arcsin \frac{d_{к.30l}}{d_{30l}} \right)}{2 \cdot d_{к.30l}} \right) \right) \right) \right) \quad (3)$$

Обсуждение

Имитационное моделирование возможных соотношений диаметров $d_{к.кр}$ ($d_{к.30l}$) отверстий для перетекания рабочей жидкости через золотниковый вал с диаметром золотника d_{30l} позволило выявить допустимую зону (выделена светло-жёлтым

цветом, рис. 3, а), с поочерёдным гарантированным созданием давления рабочей жидкости в полостях гидроцилиндра лесного манипулятора, при этом указанная зона аппроксимирована ограничивающей прямой $d_{к.30l} = 0,3827 \cdot d_{30l}$.

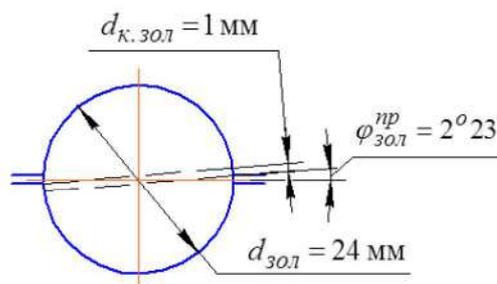
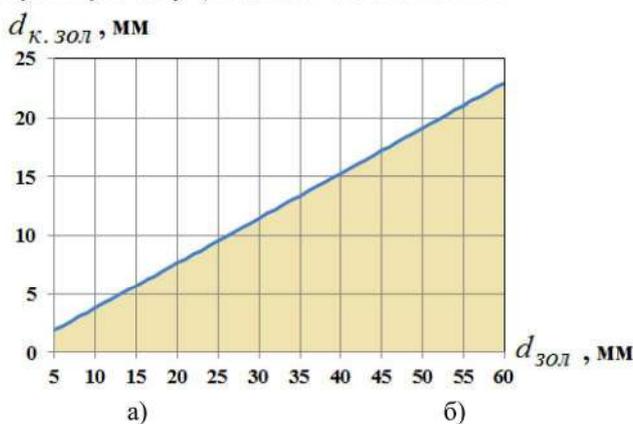


Рисунок 3. Соотношения диаметров отверстий перетекания рабочей жидкости через золотниковый вал
 Источник: собственные вычисления авторов

Figure 3. Ratios of the diameters of the holes for the flow of working fluid through the spool shaft
 Source: authors' own calculations

Исследованиями установлено, что кроме предельного угла φ_{30l}^{np} начала и окончания перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса

пульсатора дополнительным ограничением реальных соотношений рассматриваемых диаметров элементов гидравлического пульсатора лесного манипулятора является формируемый пульсатором объём рабочей жидкости, поглощаемый полостями

гидроцилиндра. Так, для диаметров отверстий в золотниковом валу $d_{к.зол} = 1$ мм и диаметре золотникового вала $d_{зол} = 24$ мм обеспечивается предельный, теоретически допустимый, угол $\varphi_{зол}^{np} = 2^{\circ}23'$ (рис. 3, б). Однако при этом суммарный расход жидкости, прошедшей через канал золотника за 1 с будет равен $1,28893 \cdot 10^{-5}$ м³/с (или 0,012889332 л/с), что, несомненно, мало для формирования значительного импульса силы на штоке промышленного гидроцилиндра манипулятора лесохозяйственной машины.

При исследовании зависимости времени t_{dp} (с) перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора выявлено (рис. 4, а), что возрастание частоты вращения золотникового вала пульсатора при $\varphi_{зол}^{np} = const$ (по существу – при неизменных величинах $d_{к.зол}$ и $d_{зол}$) приводит к снижению времени перетекания t_{dp} . При $n_{зол} = const$ увеличением диаметров отверстий $d_{к.зол}$ (или – уменьшением диаметра золотникового вала $d_{зол}$, фактически при $\varphi_{зол}^{np} \rightarrow max$) можно достичь увеличения значений времени t_{dp} , максимальные значения которого наблюдаются в

зоне малых частот вращения золотникового вала $n_{зол} = 10...20$ об/мин.

Исследованием зависимости времени t_{dp} перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора от диаметров отверстий $d_{к.зол}$ и $d_{зол}$ выявлено (рис. 4, б), что увеличение диаметра золотникового вала (при $d_{к.зол} = const$) обеспечивает снижение времени перетекания рабочей жидкости, при зависимости $t_{dp} = f(d_{зол})$ могут быть охарактеризованы степенными линиями увеличивающегося порядка. Так, для принятой в исследование частоты вращения золотника гидравлического пульсатора $n_{зол} = 60$ об/мин зависимость $t_{dp} = f(d_{зол})$ при $d_{к.зол} = 5$ мм может быть описана степенной линией $t_{dp} = 3,31903 d_{зол}^{-1,0102}$ со средним отклонением полученных расчётных значений t_{dp} от фактических (ошибкой аппроксимации) $\bar{A} = 0,17\% < [A] = 7\%$; при $d_{к.зол} = 15$ мм – степенной линией $t_{dp} = 21,21314 d_{зол}^{-1,1998}$ с ошибкой аппроксимации $\bar{A} = 5,66\%$; при $d_{к.зол} = 25$ мм – степенной линией $t_{dp} = 58,94142 d_{зол}^{-1,3167}$ с ошибкой аппроксимации $\bar{A} = 5,48\%$.

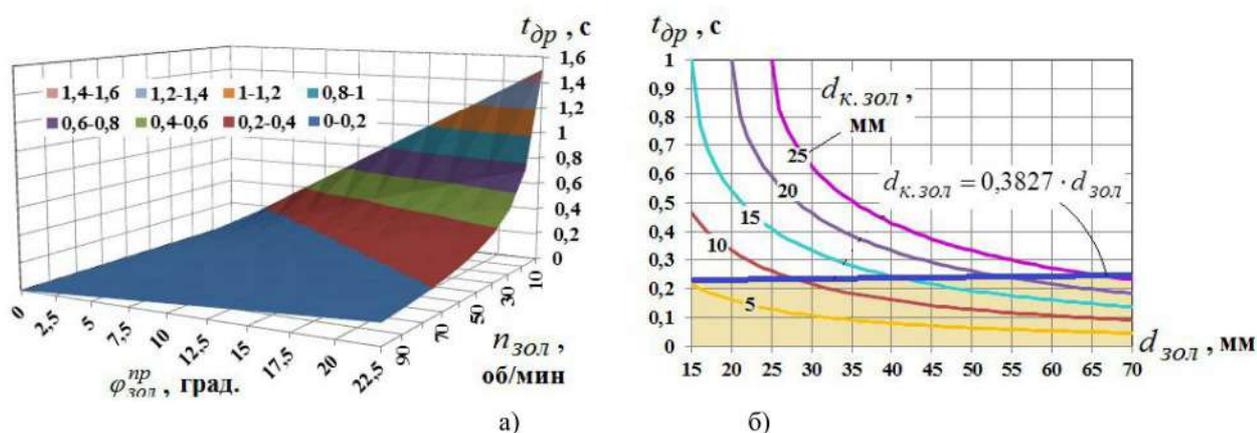


Рисунок 4. Зависимости времени перетекания жидкости по золотниковому валу от параметров пульсатора

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 4. Dependences of the time of liquid flow along the spool shaft on the pulsator parameters

Source: authors' own calculations

Совмещение графика зависимости $t_{др} = f(d_{зол}, d_{к.зол})$ с аппроксимированной ограничивающей прямой $d_{к.зол} = 0,3827 \cdot d_{зол}$ выявило допустимую зону (выделена светло-жёлтым цветом, рис. 4, б) вариации времени $t_{др}$. При этом, например, для частоты вращения золотникового вала $n_{зол} = 60$ об/мин целесообразны следующие значения влияющих параметров гидравлического пульсатора: диаметр отверстия в золотниковом валу $d_{к.зол} = 5$ мм при диаметре указанного вала $d_{зол} = 15 \dots 70$ мм и более; $d_{к.зол} = 10$ мм и $d_{зол} \geq 28$ мм; $d_{к.зол} = 15$ мм и $d_{зол} \geq 43$ мм; $d_{к.зол} = 20$ мм и $d_{зол} \geq 54$ мм; $d_{к.зол} = 25$ мм и $d_{зол} \geq 65$ мм.

Исследованием зависимости времени $t_{выд}$ (с) отсутствия перетекания жидкости по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора от диаметра указанного вала $d_{зол}$ и частоты вращения этого вала $n_{зол}$ выявлено (рис. 5), что увеличение диаметра золотникового вала (при $n_{зол} = const$) обеспечивает возрастание значений времени $t_{выд}$. В частности, при диаметре отверстия в золотниковом валу $d_{к.зол} = 5$ мм в зоне малых частот вращения $n_{зол}$ возрастание времени $t_{выд}$ составляет по абсолютным величинам $0,18 \dots 0,36$ с, а при дальнейшем увеличении $n_{зол}$ время выдержки рабочей жидкости изменяется незначительно (при средних значениях $n_{зол} = 40 \dots 70$ об/мин время варьируется в диапазоне $t_{выд} = 0,06 \dots 0,09$ с, при $n_{зол} > 70$ – в диапазоне $0,03 \dots 0,05$ с). При неизменных величинах диаметра золотникового вала ($d_{зол} = const$) наибольшие величины времени $t_{выд}$ наблюдаются в зоне малых частот вращения $n_{зол} = 10 \dots 20$ об/мин, при этом зависимость $t_{выд} = f(n_{зол})$ аппроксимируется полиномиальной линией второго порядка.

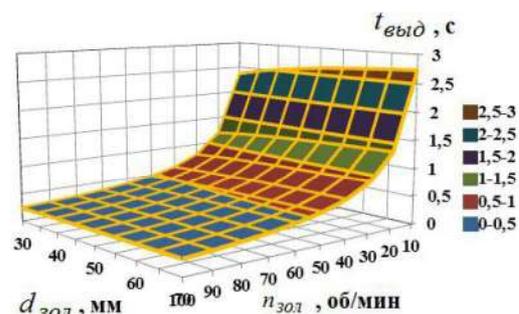


Рисунок 5. Зависимость времени отсутствия перетекания рабочей жидкости от диаметра и частоты вращения золотникового вала

Источник: собственные вычисления авторов
 Figure 5. Dependence of the time of absence of flow of the working fluid on the diameter and frequency of the spool shaft

Source: authors' own calculations

Моделирование объёма $Q_{мп}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) рабочей жидкости, прошедшей по каналам золотникового вала и корпуса пульсатора и поступившей в рукава высокого давления выявило его зависимость от внутреннего диаметра $d_{мп}$ (м) соответствующего рукава, а также от скорости $v_{нан}$ (м/с) потока указанной жидкости ($Q_{мп} = (\pi \cdot d_{мп}^2 / 4) \cdot v_{нан}$). Анализ полученных зависимостей $Q_{мп} = f(d_{мп}, v_{нан})$ позволил установить, что для наиболее востребованных в машинах лесохозяйственной направленности рукавах высокого давления с диаметрами $d_{мп} = 8 \dots 16$ мм величины объёма (расхода) рабочей жидкости не превышают $Q_{мп} = 0,00101 \text{ м}^3/\text{с}$ (1,01 л/с).

Исследованием объёма рабочей жидкости, поступившей в полости гидроцилиндра, установлено, что при $n_{зол} = const$ увеличение диаметра золотникового вала $d_{зол}$ обеспечивает снижение объёмов рабочей жидкости, при этом зависимости $Q_{нт} = f(d_{к.зол}, n_{зол})$ аппроксимируются полиномиальными линиями второго порядка с более интенсивными темпами уменьшения величин $Q_{нт}$ или $Q_{шт}$ в зоне малых частот вращения золотникового вала ($n_{зол} = 10 \dots 20$ об/мин).

Заключение

В ходе анализа установлено, что взаимосвязь допустимых величин диаметров золотникового вала $d_{к.зол}$ гидравлического пульсатора и отверстия $d_{зол}$ для перетекания сквозь него рабочей жидкости подчиняется соотношению $d_{к.зол} \leq d_{зол} \cdot \sin 22^{\circ}30'$ (мм).

Выявлено, что площадь S_0) отверстия перетекания жидкости, изменяющаяся во времени, является функцией угла поворота $\varphi_{зол}$ оси отверстия золотникового вала, а также геометрическими параметрами — диаметрами отверстия (do) и вала (Ds). Динамически изменяющаяся площадь (A(t)) оказывает существенное влияние на потребление рабочей жидкости штоковой ($Q_{шт}$) или поршневой $Q_{пн}$ полостями гидроцилиндра. При этом потребление рабочей жидкости также зависит от частоты вращения золотникового вала $n_{зол}$ и скорости потока рабочей жидкости $V_{нал}$ в гидравлических рукавах высокого давления, создавая комплексное гидродинамическое взаимодействие в системе.

На основании теоретического и имитационного моделирования обоснована допустимая зона варибельности диаметров отверстий (do) и вала (Ds), соответствующих отверстий. Данная зона обеспечивает стабильное и поочередное формирование давления рабочей жидкости в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра манипулятора лесохозяйственной машины. Это гарантирует устойчивую работу гидравлической системы в широком диапазоне технологических условий.

Исследования показали, что наибольшие значения времени перетекания рабочей жидкости $t_{др} = 1...1,6$ с наблюдаются при относительно низких частотах вращения золотникового вала, находящихся в пределах $n_{зол} = 10...20$ об/мин. Данные параметры соответствуют рабочим режимам с минимальными энергетическими потерями, но увеличенным временем формирования импульсов давления.

Для достижения допустимых величин времени перетекания $t_{др}$ в диапазоне частот вращения золотникового вала $n_{зол} = 60$, было определено,

что необходимо учитывать следующие значения диаметра отверстия (do) и диаметра золотникового вала (Ds):

$d_{зол} = 15...70$ мм и более; $d_{к.зол} = 10$ мм и $d_{зол} \geq 28$ мм; $d_{к.зол} = 15$ мм и $d_{зол} \geq 43$ мм; $d_{к.зол} = 20$ мм и $d_{зол} \geq 54$ мм; $d_{к.зол} = 25$ мм и $d_{зол} \geq 65$ мм.

Особое внимание уделено минимальным значениям диаметра отверстия $d_{к.зол} = 5$ мм в зоне низ-

ких частот вращения золотникового вала $n_{зол}$. В данном случае абсолютное увеличение времени перетекания жидкости $t_{быд}$ составляет 0,18...0,36 с., что подчеркивает влияние малых геометрических параметров на эффективность работы гидравлической системы.

Для гидравлических рукавов высокого давления стандартной лесохозяйственной направленности с внутренними диаметрами $d_{мп} = 8...16$ мм величины расхода рабочей жидкости не превышают 0,00101 м³/с (1,01 л/с).

Это соответствует требованиям, предъявляемым к механическим системам для манипуляторов в лесозаготовительных машинах.

Полученные результаты подчеркивают важность корректного выбора диаметров отверстий (do) и вала (Ds), а также частоты вращения (ns) для обеспечения эффективности работы гидравлического пульсатора. Определённые зависимости и допуски по параметрам взаимодействующих элементов системы позволяют оптимизировать рабочие процессы манипулятора лесохозяйственных машин, минимизируя энергетические затраты и обеспечивая высокую точность управления.

Результаты проведённого исследования имеют высокую прикладную значимость для лесохозяйственной отрасли, особенно в направлении проектирования и эксплуатации манипуляторных систем машин, используемых для подготовки территорий к выращиванию лесных культур и их дальнейшему уходу. Основные аспекты прикладного значения включают:

1. Полученные зависимости между конструктивными параметрами (диаметр золотникового вала (D_s), диаметр отверстий (d_o), частота

вращения (n_s) и рабочими характеристиками пульсатора позволили определить оптимальные геометрические и режимные параметры. Это может быть использовано для проектирования новых высокоэффективных пульсаторов для лесных манипуляторов, способных работать в широком диапазоне нагрузок без значительных потерь энергии.

2. Снижение энергозатрат манипуляторной системы:

Оптимизация времени перетекания жидкости (t_f), частоты вращения (n_s) и расхода жидкости (Q) позволяет существенно снизить гидродинамические потери, что приводит к уменьшению общего энергопотребления системы. Это особенно важно для работы лесохозяйственных машин в условиях ограниченных энергоресурсов и высокой интенсивности выполнения технологических операций.

3. Повышение производительности лесных машин:

Применение адаптированных гидравлических пульсаторов с учётом полученных параметров обеспечивает точное и равномерное управление манипулятором, улучшая качество выполнения операций, таких как расчистка территории, удаление корней и камней, перемещение грузов. Это непосредственно влияет на производительность лесоразработок и снижение затрат на их проведение.

4. Повышение надёжности техники:

Стабильная работа гидравлических систем, разработанных с учётом выявленных параметров, способствует увеличению срока службы ключевых узлов и компонентов, таких как гидроцилиндры, золотниковые валы и рукава высокого давления. Соответственно, снижается вероятность отказа оборудования, что особенно важно для техники, работающей в сложных условиях лесного хозяйства.

5. Применение в других отраслях:

Полученные результаты имеют потенциал к масштабированию на гидравлические системы манипуляторов, применяемых в смежных областях промышленности. Например, в строительной, сельскохозяйственной и дорожной технике, где активно используются гидравлические системы для выполнения точных и энергоэффективных операций.

6. Разработка адаптивных систем управления:

Результаты моделирования и зависимости, выявленные в рамках исследования, могут быть интегрированы в системы автоматизированного управления гидравлическими манипуляторами. Это включает разработку программного обеспечения, которое будет учитывать режимные характеристики пульсатора и автоматически адаптировать их под текущий технологический процесс.

7. Снижение эксплуатационных расходов:

Рассчитанные параметры расхода рабочей жидкости (Q) и времени её перетекания (t_f) позволяют снизить нагрузку на элементы гидравлической системы, что уменьшает износ рабочих компонентов и сокращает расходы на обслуживание техники. Кроме того, снижение энергопотребления, связанное с оптимизацией процессов, сокращает затраты на эксплуатацию машин.

8. Поддержка экологичной эксплуатации:

Благодаря снижению энергозатрат и повышению точности работы машин, использование оптимизированных гидравлических пульсаторов способствует минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Это особенно важно в лесохозяйственной отрасли, где устойчивое использование природных ресурсов является приоритетной задачей.

9. Практическое применение в образовательных и научных целях:

Результаты исследования могут быть использованы для подготовки специалистов в области гидравлических систем и лесохозяйственных технологий. Выявленные зависимости и предложенные методики оптимизации могут стать основой для создания образовательных программ, а также послужить отправной точкой для будущих научных исследований в этой области.

Таким образом, разработанная математическая модель, полученные зависимости и обоснованные рекомендации могут быть внедрены в реальные производственные условия при создании и улучшении манипуляторных систем лесохозяйственных машин. Это окажет непосредственное влияние на экономическую эффективность, производительность и экологическую устойчивость процессов лесного хозяйства.

Список литературы

1. Zanchi G., Lucander K., Kronnäs V. [et al] *Modelling the effects of forest management intensification on base cation concentrations in soil water and on tree growth in spruce forests*. European Journal of Forest Research. 2021; 140(6): 182. DOI: 10.1007/s10342-021-01408-6.
2. Krüger M., Vogel-Heuser B., Waterman D. [et al] *Inferring Cable-Suspended End-Effector Oscillations From Hydraulic Actuators' Responses in Diaphragm Wall Hydraulic Grabs*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2025; 99: 1-16. DOI:10.1109/TASE.2024.3521599
3. Popikov P.I., Derepasko I.V., Khomenko K.G. [et al] *Analysis of studies of work processes of energy-saving hydraulic drives and devices of highly loaded technological machines and equipment*. E3s web of conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2023): EDP Sciences, 2023; 01039. DOI 10.1051/e3sconf/202346201039.
4. Попиков П.И., Четверикова И.В., Евсиков И.Д. [и др.] Исследование и обоснование компоновки и параметров гидропривода механизма подъема лесного манипулятора. Resources and Technology. 2023; 20(3): 76-93. DOI 10.15393/j2.art.2023.7063.
5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю. Моделирование поворотного механизма гидроманипулятора лесовозного автомобиля. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024; 5(401): 143-158. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-143-158
6. Анисимов С.Е., Царев Е.М., Рукомойников К.П. Многозвенный комбинированный манипулятор для рубок ухода за лесом. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024; 250: 238-251. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.238-251
7. 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
8. Saoud I., Hatim I.J., Asaad C. [et al] Design optimization and trajectory planning of a strawberry harvesting manipulator. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2024; 13: 3948-3959. DOI: 10.11591/eei.v13i6.7957.
9. Евсиков И.Д., Богданов Д.С., Попикова А.В., Конюхов А.В. Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора. Лесотехнический журнал. 2023; 3(51): 131-142. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10
10. Дорняк О.Р., Маркова Л.В., Танчук П.В., Попиков С.К. Динамическое нагружение элементов гидросистемы манипулятора лесовозной машины при выравнивании рамы поворотного устройства. Лесотехнический журнал. 2024; 14: 168-187. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10
11. Ding R., Liu Z., Li G. [et al] *High-Precision and Modular Decomposition Control for Large Hydraulic Manipulators*. Actuators. 2023; 12(11): 405. DOI: 10.3390/act12110405
12. Liu Z., Yang S., Cheng C. [et al] *Study on modeling and dynamic performance of a planar flexible parallel manipulator based on finite element method*. Mathematical Biosciences and Engineering. 2022; 20(1): 807-836. DOI: 10.3934/mbe.2023037
13. Rao P., Roy D., Chakraverty S. *Vibration Analysis of Single-Link Flexible Manipulator in an Uncertain Environment*. Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2023; 12: 231-258. DOI: 10.1007/s42417-023-01007-2.
14. Pietruś P., Gierlak P. Influence of the Manipulator Configuration on Vibration Effects. Acta Mechanica et Automatica. 2023; 17(4): 515-522. DOI: 10.2478/ama-2023-0060
15. Tuong N., Truong T., Khanh P. [et al] *Structure and Hydraulic Analysis of a 5-Ton Hydraulic Press by Simulation*. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2024; 58: 8-15. DOI:10.3233/ATDE240597
16. Obertyukh R., Slabkyi A., Petrov O. [et al] *Substantiation of the methodology for calculating the design of a small-sized hydraulic pulse vibrator*. Vibroengineering Procedia. 2024; 56: 22-28. DOI: 10.21595/vp.2024.24512
17. Zaripova L., Shaydakov V. *Hydromechanical vibrator-pulsator for restoring the injectivity of injection wells*. E3S Web of Conferences. 2024; 524(9): 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202452403029

18. Mikheev N., Goltsman A., Paereliy A. [et al] *Experimental setup for generation and control of sinusoidal pulsatile channel flow*. Journal of Physics: Conference Series. 2017; 891: 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012064
19. Goltsman A., Saushin I., Mikheev N. [et al] *Generation of sinusoidal pulsating flows in the channels of experimental setups*. Flow Measurement and Instrumentation. 2019; 66: 60-66. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.006
20. Ren Q., Kou Z., Wu J. [et al] *Development and Parametric Analysis of Vibration System Controlled by Hydraulic Shock Rotary Vibrator*. Shock and Vibration. 2021; 1: 1-21. DOI: 10.1155/2021/1082963
21. 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
22. Li J., Wang Y., Kong L. *Synchronization characteristics of two vibrators in a novel hydraulic coupling system*. Alexandria Engineering Journal. 2022; 61(12): 11663-11676. DOI: 10.1016/j.aej.2022.05.040

References

1. Zanchi G., Lucander K., Kronnäs V. [et al] *Modelling the effects of forest management intensification on base cation concentrations in soil water and on tree growth in spruce forests*. European Journal of Forest Research. 2021; 140(6): 182. DOI: 10.1007/s10342-021-01408-6.
2. Krüger M., Vogel-Heuser B., Waterman D. [et al] *Inferring Cable-Suspended End-Effector Oscillations From Hydraulic Actuators' Responses in Diaphragm Wall Hydraulic Grabs*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2025; 99: 1-16. DOI:10.1109/TASE.2024.3521599
3. Popikov P.I., Derepasko I.V., Khomenko K.G. [et al] *Analysis of studies of work processes of energy-saving hydraulic drives and devices of highly loaded technological machines and equipment*. E3s web of conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2023): EDP Sciences, 2023; 01039. DOI 10.1051/e3sconf/202346201039.
4. Popikov P.I., Chetverikova I.V., Evsikov I.D. [et al.] *Research and justification of the layout and parameters of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator*. Resources and Technology. 2023; 20(3): 76-93. (In Russ.). DOI 10.15393/j2.art.2023.7063.
5. Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovsky A.Yu. *Modeling the rotary mechanism of a timber truck hydraulic manipulator*. News of higher educational institutions. Forest Journal. 2024; 5(401): 143-158. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-143-158
6. Anisimov S.E., Tsarev E.M., Rukomoynikov K.P. *Multi-link combined manipulator for forest thinning*. News of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2024; 250: 238-251. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.250.238-251
7. 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
8. Saoud I., Hatim I.J., Asaad C. [et al] *Design optimization and trajectory planning of a strawberry harvesting manipulator*. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2024; 13: 3948-3959. DOI: 10.11591/eei.v13i6.7957.
9. Evsikov I.D., Bogdanov D.S., Popikova A.V., Konyukhov A.V. *Influence of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forestry manipulator mechanisms*. Forestry Engineering Journal. 2023. 3(51): 131-142. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10
10. Dornyak O.R., Markova L.V., Tanchuk P.V., Popikov S.K. *Dynamic loading of elements of the hydraulic system of a timber truck manipulator when leveling the frame of the rotary device*. Forestry Engineering Journal. 2024; 14: 168-187. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10
11. Ding R., Liu Z., Li G. [et al] *High-Precision and Modular Decomposition Control for Large Hydraulic Manipulators*. Actuators. 2023; 12(11): 405. DOI: 10.3390/act12110405

12. Liu Z., Yang S., Cheng C. [et al] *Study on modeling and dynamic performance of a planar flexible parallel manipulator based on finite element method*. Mathematical Biosciences and Engineering. 2022; 20(1): 807-836. DOI: 10.3934/mbe.2023037
13. Rao P., Roy D., Chakraverty S. *Vibration Analysis of Single-Link Flexible Manipulator in an Uncertain Environment*. Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2023; 12: 231-258. DOI: 10.1007/s42417-023-01007-2.
14. Pietruś P., Gierlak P. *Influence of the Manipulator Configuration on Vibration Effects*. Acta Mechanica et Automatica. 2023; 17(4): 515-522. DOI: 10.2478/ama-2023-0060
15. Tuong N., Truong T., Khanh P. [et al] *Structure and Hydraulic Analysis of a 5-Ton Hydraulic Press by Simulation*. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2024; 58: 8-15. DOI:10.3233/ATDE240597
16. Obertyukh R., Slabkyi A., Petrov O. [et al] *Substantiation of the methodology for calculating the design of a small-sized hydraulic pulse vibrator*. Vibroengineering Procedia. 2024; 56: 22-28. DOI: 10.21595/vp.2024.24512
17. Zaripova L., Shaydakov V. *Hydromechanical vibrator-pulsator for restoring the injectivity of injection wells*. E3S Web of Conferences. 2024; 524(9): 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202452403029
18. Mikheev N., Goltsman A., Paereliy A. [et al] *Experimental setup for generation and control of sinusoidal pulsatile channel flow*. Journal of Physics: Conference Series. 2017; 891: 012064. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012064
19. Goltsman A., Saushin I., Mikheev N. [et al] *Generation of sinusoidal pulsating flows in the channels of experimental setups*. Flow Measurement and Instrumentation. 2019; 66: 60-66. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.006
20. Ren Q., Kou Z., Wu J. [et al] *Development and Parametric Analysis of Vibration System Controlled by Hydraulic Shock Rotary Vibrator*. Shock and Vibration. 2021; 1: 1-21. DOI: 10.1155/2021/1082963
21. 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
22. Li J., Wang Y., Kong L. *Synchronization characteristics of two vibrators in a novel hydraulic coupling system*. Alexandria Engineering Journal. 2022; 61(12): 11663-11676. DOI: 10.1016/j.aej.2022.05.040

Сведения об авторах

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706> e-mail: md@vglta.vrn.ru

✉ *Платонов Алексей Александрович* – 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/0000-0003-4114-4636>, e-mail: paa7@rambler.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.

Information about the authors

Mikhail V. Drapalyuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: md@vglta.vrn.ru.

✉ *Aleksey A. Platonov* – Cand. Sci. (Techn.), Associate 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/0000-0003-4114-4636>, e-mail: paa7@rambler.ru.

Pyotr I. Popikov – Doctor of Technical Sciences, 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.

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/13>

УДК 630* 631.3.06

Полевые исследования модульных рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего орудия

Сергей В. Малюков¹ ✉, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

Михаил Н. Лысыч¹, vum1@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Леонид Д. Бухтояров¹, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Михаил В. Шавков², shavkovmv@mail.ru,  0000-0003-3700-7508

Александр Ф. Петков¹, alexanderpetkoff@mail.ru,  0000-0002-6348-8934

Максим А. Попов¹, porovmaxim98@mail.ru,  0009-0002-6356-5028

Дмитрий С. Черенков¹, chierienkov1999@mail.ru,  0009-0000-1257-6902

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

²*ООО «Русгидроком», ул. Мазлумова, д. 25, г. Воронеж, 394040, Российская Федерация*

Аннотация

Работы по созданию новых и модернизации существующих агрегатов и комбинированных машин проводятся как в России, так и за рубежом. Ведущая роль в них отводится снижению энергозатрат и увеличению качества обработки почвы. Огромное разнообразие климатических и почвенных условий диктуют конструкторам свои правила по созданию современных агрегатов и машин. Существующие машины довольно хорошо справляются с поставленными задачами, но работы по их усовершенствованию должны продолжаться. Это требует от исследователей проявления новых конструкторских и научных решений. Научная новизна состоит в разработке новой конструкции рамы почвообрабатывающего орудия со сменными модульными рабочими органами, а также в определении качественных и энергетических показателей работы агрегата. Цель исследований – определение тягового сопротивления комбинированного почвообрабатывающего орудия в полевых условиях в зависимости от конструктивных и технологических параметров модульных рабочих органов. При проведении полевых исследований использовался метод тензометрирования. При обработке данных полевых экспериментов максимальное тяговое сопротивление для двух дисковых плужных рабочих органов достигло значения $F_{xyz} = 5013.20$ Н, для пары дисковых батарей – $F_{xyz} = 3135.82$ Н, для двух ножевых катков – $F_{xyz} = 5337.81$ Н. На основе полученных экспериментальных данных можно спроектировать комбинированные агрегаты, состоящие из нескольких видов рабочих органов. При этом подбор орудий будет осуществлен исходя из тягового класса трактора. Под определенный класс трактора можно будет подобрать определенное сочетание рабочих органов с требуемыми конструктивными и технологическими параметрами. Такие комбинации позволят в дальнейшем повысить качество и эффективность почвообработки, уменьшат расход топлива при выполнении работ.

Ключевые слова: *тензометрическая станция ZET 058, дисковые рабочие органы, ножевые катки, почвообрабатывающие орудия, тяговое сопротивление рабочих органов, вырубки, комбинированные машины.*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Полевые исследования модульных рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего орудия / С. В. Малуков, М. Н. Лысыч, Л. Д. Бухтояров, М. В. Шавков, А. Ф. Петков, М. А. Попов, Д. С. Черенков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 207-223. – Библиогр.: с. 219-222 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/13>.

Поступила 14.11.2024. Пересмотрена 24.04.2025. Принята 26.05.2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.

Article

Field studies of modular working bodies of combined tillage tool

Sergey V. Malyukov¹✉, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

Mikhail N. Lysych¹, vum1@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Leonid D. Bukhtoyarov¹, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Michael V. Shavkov², shavkovmv@mail.ru,  0000-0003-3700-7508

Alexander F. Petkov¹, alexanderpetkoff@mail.ru,  0000-0002-6348-8934

Maksim A. Popov¹, popovmaxim98@mail.ru,  0009-0002-6356-5028

Dmitry S. Cherenkov¹, chierenkov1999@mail.ru,  0009-0000-1257-6902

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

² LLC Rushydrocom, Mazlumova street, 25, Voronezh, 394040, Russian Federation

Abstract

Works on creation of new and modernization of existing aggregates and combined machines are carried out both in Russia and abroad. The leading role in them is given to reducing energy consumption and increasing the quality of soil tillage. Huge variety of climatic and soil conditions dictate to designers their own rules for creation of modern aggregates and machines. Existing machines cope with the set tasks quite well, but works on their improvement should be continued. This requires from researchers the manifestation of new design and scientific solutions. The scientific novelty consists in the development of a new design of the frame of a tillage implement with interchangeable modular working bodies, as well as in the determination of qualitative and energy indicators of the unit operation. The purpose of research is to determine the traction resistance of combined tillage tool in field conditions depending on the design and technological parameters of modular working bodies. The strain gauge method was used in the field research. When processing the data of field experiments, the maximum traction resistance for two disk plow working bodies reached the value $F_{xyz} = 5013.20$ N, for a pair of disk batteries - $F_{xyz} = 3135.82$ N, for two knife rollers - $F_{xyz} = 5337.81$ N. On the basis of the obtained experimental data it is possible to design combined aggregates consisting of several types of working tools. In this case, the selection of implements will be carried out based on the tractor traction class. For a certain class of tractor it will be possible to select a certain combination of working tools with the required design and technological parameters. Such combinations will further improve the quality and efficiency of soil tillage and reduce fuel consumption during work.

Keywords: strain gauge station ZET 058, disk implements, knife rollers, tillage implements, traction resistance of implements, cuttings, combined machines.

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Acknowledgement: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Malyukov S. V., Lysych M.N., Bukhtoyarov L. D., Shavkov M. V., Petkov A. F., Popov M. A., Cherenkov D. S. (2025) Field studies of modular working bodies of combined tillage tool. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 207-223 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/13>.

Received 14.11.2024. *Revised* 24.04.2025. *Accepted* 26.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Работы по разработке новых и модернизации существующих агрегатов и комбинированных машин проводятся как в России [1, 2], так и за рубежом [3, 4]. Ведущая роль, при этом, отводится снижению энергозатрат и увеличению качества обработки почвы [5, 6].

В лесном [7] и сельском [8] хозяйстве, в настоящее время, осуществляются обширные работы по оптимальному подбору рабочих органов для комбинированных машин, не взирая на их значительный технический уровень. Огромное разнообразие климатических и почвенных [9] условий диктуют конструкторам свои правила по созданию современных агрегатов и машин, способных эффективно проводить обработку почвы.

Расстановка рабочих органов оказывает значительное влияние на их взаимодействие в процессе работы. Особенно это отражается на энергозатратах и качестве выполнения работ. Поэтому при конструировании новых машин и агрегатов стараются определить не только оптимальные параметры рабочих органов по отдельности, но и при их совместной работе. Снижать экономические затраты при производстве комбинированных машин сейчас стараются путем установки стандартных рабочих органов, которые показали высокую эффективность своей работы [10].

Не решенной научной задачей остается изучение процесса взаимодействия рабочих органов с почвой и влияния схемы расстановки органов и их параметров на качество обработки. Это помогает разработать конструкции, которые обеспечивают требуемое сложение обрабатываемого слоя почвы, благоприятное для роста и развития растений.

Не решенными прикладными задачами остаются: 1) Снижение переуплотнения и деградации плодородных слоев почвы за счёт комбинированной обработки. 2) Изучение влияния на почву новых

приёмов механической обработки. В частности, актуально исследование дифференциации пахотного слоя по плодородию, так как действие современных почвообрабатывающих машин на этот процесс остаётся во многом неясным.

Поэтому работы, изучающие взаимодействия различных рабочих органов, являются актуальными и заслуживают внимания.

Бойков В.М. и др. (2020) [11] представили классификацию почвообрабатывающих машин по конструктивным и технологическим параметрам, которая позволяет обосновать оптимальный выбор того или иного агрегата или технологии обработки почвы.

Авторами [12, 13] проводились исследования по изучению влияния различных конструкций машин и агрегатов на процессы образования эрозии почвы. Определенные исследования в этой области проводились учеными Жук А.Ф. и др. (2020) [14]. В качестве экспериментального образца ими был выбран плоскорез-рыхлитель ПРК-2,5У. В публикации подробно описано устройство агрегата, технологический процесс обработки почвы, представлены преимущества применения данного агрегата при борьбе с эрозией почвы. Однако, в статье не достаточно полно представлены результаты сравнения агротехнических и экономических показателей работы исследуемого агрегата с однооперационными орудиями. Раднаев Д.Н. и Дамбаева Б.Е. (2021) [15] произвели анализ агрегатов АПД-7,2 и АПК-7,2. Авторы отмечают, что в процессе обработки почв в условиях недостаточного увлажнения плоскорезующих лапы агрегата АПД-7,2 не засоряются сорняками, агрегат не нужно переоборудовать при смене вида работ, и он меньше расходует топлива. При этом, в работе недостаточно четко раскрыты пути дальнейшего совершенствования конструкций комбинированных машин.

В настоящее время ведутся исследования по совершенствованию параметров рабочих органов,

установленных на комбинированных агрегатах. В статье Яхина С.М. и др. (2020) [16] упоминается новая конструкция игольчатых дисков. К некоторым недостаткам кинематики можно отнести: неустойчивая работа орудия из-за нестабильности движения дисков; проскальзывание дисков при повышенных скоростях, что снижает эффективность работы. Авторами [17] проводилась сравнительная оценка работы машин для обработки почвы. В результате проведенных исследований они рекомендуют использовать фрезерные машины с активным ротором в комбинации со стрелчатыми лапами или рыхлительными долотами. Фрезерные машины имеют экономические и технические недостатки. Экономические: 1) Повышенные энергозатраты. 2) Неполное уничтожение сорняков. Фрезеровка рубит корни сорняков на мелкие частицы, что способствует их размножению. Технические: 1) Невозможность точной регулировки глубины обработки. Для поддержания стабильной глубины грунта фрезы часто оснащаются прикатывающим катком, который увеличивает затраты. 2) Сложность работы на каменистых почвах. Взаимодействие ножей с крупными камнями вызывает много огрехов, снижающих качество обработки.

Научные исследования, проводимые Тарасенко Б.Ф. и др. (2021) [18], Малюковым С.В. и др. (2023) [19, 20] позволили определить энергетические и качественные показатели работы почвообрабатывающих агрегатов. Было выявлено, что комбинированные машины позволяют повысить качество обработки почвы и производительность агрегата. При этом, уменьшаются потери влаги и вредное воздействие машин на почву.

Достоинство комбинированных агрегатов состоит в том, что в зависимости от условий можно использовать агрегат в целом, либо отдельные рабочие органы агрегата. Это значительно повышает эффективность использования почвообрабатывающих орудий. Недостатком комбинированных агрегатов является их значительная длина. Набор навесных орудий ограничен из-за опасности нарушить продольную устойчивость трактора. Ширина захвата комбинированных агрегатов ограничивается требованиями минимальной габаритной ширины в транспортном положении.

Существующие машины довольно хорошо справляются с поставленными задачами, но работы по их усовершенствованию все же должны продолжаться. Это требует от исследователей проявления новых конструкторских и научных решений.

Приведенные выше работы показывают связь между качеством обработки почвы, расстановкой рабочих органов и энергетическими затратами.

Цель исследований – определение тягового сопротивления комбинированного почвообрабатывающего орудия в полевых условиях в зависимости от конструктивных и технологических параметров модульных рабочих органов.

Задачи:

- изучить влияния конструктивных параметров на изменение нагрузок в звеньях комбинированной почвообрабатывающей при движении по вырубкам.
- определить тяговое сопротивление комбинированной почвообрабатывающей на вырубке;
- изучить влияние модульных рабочих органов на качество обработки почвы и удаление поросли на вырубках.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объект: модульные почвообрабатывающие рабочие органы.

Предмет: взаимодействие дисковой батареи, сферических дисков, ножевого катка с почвой.

Сбор данных

Были проведены экспериментальные полевые исследования. При проведении эксперимента использовался колесный трактор МТЗ-80 (рис. 1).



Рисунок 1. Лабораторный образец комбинированной почвообрабатывающей машины с дисковыми орудиями в полевых условиях

Figure 1. Laboratory sample of combined soil tillage machine with disk implements under field conditions

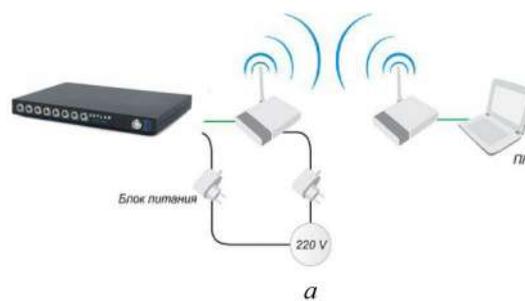
Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

При изготовлении испытуемых образцов учитывалось: легкость в сборке, дешевизна конструкции, унифицированность деталей с возможностью использования стандартных узлов и деталей различных машин.

Для проведения полевых экспериментов были подобраны несколько делянок с длиной участка до 50 метров. Тип почвы – супесчаная. Рельеф волнистый с уклонами не более 10°. Влажность почвы – 3,5-5,6 % измерялась при помощи электронного влагомера.

При проведении полевых исследований использовался метод тензометрирования [1, 8]. В полевых условиях вся тензометрическая аппаратура была установлена в кабине трактора. Тензометрическое оборудование (рис. 2) состоит из многоканальной тензометрической станции со встроенным генератором для питания датчика. Тензометрическая станция ZET 058 позволяет произвести сбор данных с S-образного тензодатчика, который установлен на тензометрической навеске.



а



б

Рисунок 2. Общий вид тензометрического оборудования: а – тензометрическое оборудование; б – тензометрическое оборудование с тензонавеской в работе

Figure 2. General view of strain gauge equipment:

a - strain gauge equipment; b - strain gauge equipment with strain gauge in operation

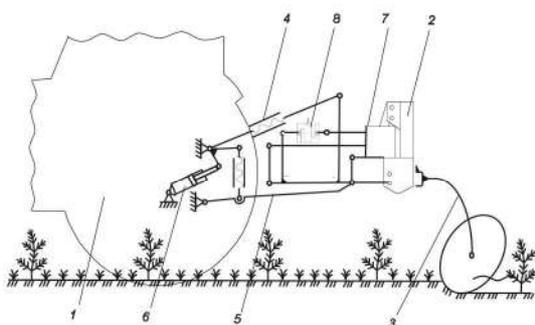
Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

Тензометрическая станция была установлена в кабине трактора, а ее питания осуществлялась от бесперебойного источника на 650 Ватт.

Передача данных с тензометрической станции Zet 058 на ноутбук осуществлялась по бесперебойному интерфейсу Wi-Fi. В модуль тензостанции была прошита оптация *Интерфейс Ethernet*.

Для измерения тягового усилия при проведении полевого эксперимента была использована тензометрическая навеска. Кинематическая схема и ее общий вид представлен на рисунке 3.



a



b

Рисунок 3. Общий вид тензометрического оборудования для определения тягового сопротивления комбинированной почвообрабатывающей машины: *a* – схема тензометрического оборудования;

b – общий вид тензометрической навески

Figure 3. General view of strain gauge equipment for determining the traction resistance of the combined tillage machine: *a* - scheme of strain gauge equipment; *b* - general view of strain gauge linkage

Источник: Собственная композиция автора
Source: Authors' own composition

Трактор 1 верхней 4 и нижними тягами 5, цеплялся к нижним пальцам тензонавески. Задняя навеска трактора поднималась и опускалась при помощи гидроцилиндра 6. Крепление тензонавески 7 к лабораторному образцу 3 осуществлялось при помощи квадратной трубы за счет шпилек и проушины рамы 2 лабораторного образца. Это позволило нам жёстко соединить тензонавеску с лабораторным образцом. Сама же тензометрическая навеска состоит из двух рамок, которые могут совершать движения друг относительно друга только в продольном

направлении. Соединяются эти две рамки за счет качающихся поводков. Степень свободы, при движении вперед, ограничивает тензосилом.

При движении трактора с лабораторным образцом вперед, происходит смещение верхней рамки относительно нижней. Из-за смещения этих двух рамок происходит растягивание тензосилом, в состав которого входит два поводка и S-образный датчик. S-образный датчик, расположенный между двумя поводками, позволяет регистрировать усилия при растяжении или сжатии. Предварительное регулирование напряжения тензосилом осуществляется за счет гайки крепления тензосилом к тензонавеске. При переводе орудия в транспортное положение, рамка с присоединенным к ней лабораторным образцом смещается вперед, тем самым снимает нагрузку с тензометрического звена.

На рисунке 4 представлен S-образный датчик силы растяжения и сжатия для определения тягового сопротивления. Номинальный выходной сигнал 2 мВ/В $\pm 1\%$, баланс нуля $\pm 2\%$. Калибровка – компания DACELL CO., LTD., Республика Корея.



Рисунок 4. Общий вид S-образного датчика силы растяжения и сжатия

Figure 4. General view of the S-shaped tensile and compressive force sensor

Источник: собственное фото авторов
Source: authors' own photo

Принцип действия тензодатчик 8 заключается в том, что растягивание тензосилом в продольном направлении преобразует механическую силу (растяжение/сжатие), которая образуется вдоль оси симметрии датчика в электрический сигнал. Все сигналы с тензодатчика поступают на тензостанцию. Далее в режиме реального времени по средствам бесперебойного интерфейса Wi-Fi поступают на ноутбук. Так как датчик откалиброван, программа в режиме реального времени показывает нагрузку, которую испытывает орудие при взаимодействии с

почвой. В программе ZETVIEW так же содержится множество библиотек и различных виртуальных приборов, по средствам которых осуществляться измерения и анализ данных.

Анализ данных

Полученные при проведении полевых экспериментов данные сохранялись в виде документов Microsoft Excel. В программе Microsoft Excel для анализа данных использовали установившийся режим работы орудий, когда влияние случайных воздействий минимально. Для обработки экспериментальных данных и их систематизации был использован инструмент «Описательная статистика».

Результаты и их обсуждение

Из-за ограниченного объема в статье представлены результаты исследований трех рабочих органов. Всего их было семь – дисковый плуг, глубокорыхлитель, плоскорез, ножевые барабаны, ротационные рыхлители, дисковые рыхлители, дисковые батареи.

Испытания дискового плуга.

Перед каждым опытом два плужных диска с углом атаки α от 10 до 30° и углом наклона $\beta=10^\circ$ устанавливались на раме экспериментальной полевой установки (рис. 5). Диаметр дисков составлял 560 мм. Два диска были установлены на встречу друг друга для компенсации силы бокового увода F_y . По оси OX действует сила сопротивления подачи F_x , по оси OZ выглубляющая сила F_z . Сложив три силы, получим результирующий вектор сопротивления движению F_{xyz} .

С помощью опорных колес диски заглублялись на необходимую глубину. В качестве предохранительного механизма на секциях рабочих органов устанавливались два типа пружин разной жесткости. Причем пружина 100x400x12 была установлена на левую секцию, а пружина 100x400x14 на правую.

После прохода дисков определялась глубина борозды. Данные по глубинам сведены в таблицу 1.

Наличие дернины, связывающей оборачиваемый диском пласт, давало возможность определить оборот пласта. Пласт считался полностью обернутым, если угол поворота пласта (задернелого слоя) был более 120°. Для угла атаки 10° оборота пласта не происходило. Для угла атаки 20° - в 30% случаев пласт был недовален, а в 70% упал обратно в борозду. Для угла атаки 30° - в 39% случаев пласт полностью обернут, в 41% - недовален, в 20% - упал обратно в борозду.



a



b

Рисунок 5. Общий вид орудия с двумя дисковыми плужными рабочими органами, установленными «вразвал»: а – угол атаки $\alpha = 10^\circ$, б – угол атаки $\alpha = 30^\circ$

Figure 5. General view of the implement with two disk plow implements mounted “off-slope”: a - angle of attack $\alpha = 10^\circ$, b - angle of attack $\alpha = 30^\circ$

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

Таблица 1

Показатели работы дисков в полевых условиях

Table 1

Disk performance in the field

Угол атаки дисков, ° Disc attack angle, °	Глубина обработки почвы, см Depth of tillage, cm	
	Левая секция Left section	Правая секция Right section
	10	8-9
20	13	15
30	14	15

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

Во время полевых исследований сразу фиксировалась результирующая сила F_{xyz} . Таким образом, у каждой из осциллограмм были выбраны режимы установившейся работы. Их показания были переведены из кг в Н (умножены на 9,81) и приведены к нормированным показателям времени (рис. 6). Среднее значение тягового сопротивления $F_{xyz} = 2569,68$ Н при $\alpha = 10^\circ$, $F_{xyz} = 4455,46$ Н при $\alpha = 20^\circ$, $F_{xyz} = 5013,20$ Н, при $\alpha = 30^\circ$ (рис. 5, 6).

Определим описательные статистические характеристики проведенных опытов для F_{xyz} , (F_{xyz1} , для $\alpha = 10^\circ$; F_{xyz2} , для $\alpha = 20^\circ$; F_{xyz3} , для $\alpha = 30^\circ$) и сведем их в таблицу 2.

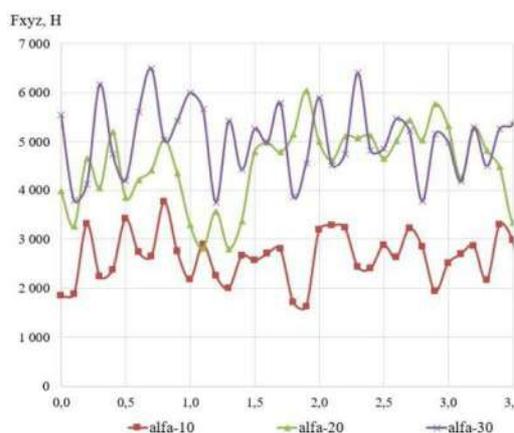


Рисунок 6. Результирующая сила сопротивления F_{xyz} на полевых испытаниях
Figure 6. Resultant drag force F_{xyz} on field tests
Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

Таблица 2

Описательные статистические характеристики F_{xyz}

Table 2

Descriptive statistical characteristics of F_{xyz}

Параметр Parameter	Опыты Experiments		
	F_{xyz1}	F_{xyz2}	F_{xyz3}
Асимметричность Asymmetry	0,13	-0,37	-0,02
Экссес Excess	-0,64	-0,65	-0,86
Уровень надежности (95,0%) Reliability level (95.0%)	164,66	254,65	241,38
Медиана Median	2623,01	4650,19	5030,70
Дисперсия выборки Sample variance	272155,64	650892,88	584830,44
Стандартная ошибка Standard error	81,47	126,00	119,43
Стандартное отклонение Standard deviation	521,69	806,78	764,74
Среднее Average	2569,68	4455,46	5013,20

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

На основе данных таблицы 2 можно сказать, что распределение в целом симметрично (соответствует нормальному). При этом величин дисперсии говорит о большом разбросе значений в массиве относительно среднего.

На основании средних значений сил сопротивления, полученных по результатам проведенной статистической обработки, построим их зависимость от углов установки дискового плуга (рис. 7).

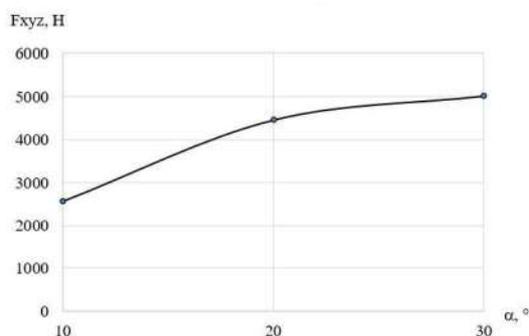


Рисунок 7. Зависимость F_{xyz} от угла установки дисковых плужных рабочих органов в полевых условиях

Figure 7. Dependence of F_{xyz} on the installation angle of disk plow bodies in field conditions

Источник: Собственная композиция автора

Source: Authors' own composition

Из рисунка 7 видно, что с увеличением угла установки дисковых плужных рабочих органов увеличивается их тяговое сопротивление, что вполне закономерно.

Данные опытов показывают, что при увеличении угла атаки дисков увеличивается количество оборнутых пластов, а количество пластов, недоваленных и упавших в борозду, при этом уменьшается. Возможными причинами не полной оборачиваемости пластов служит наличие дернины, а также несоблюдение скоростного режима движения трактора по вырубке. С увеличением угла атаки дисков повышается эффективность работы агрегата.

Испытания дискового культиватора.

При проведении полевых испытаний изучалась работа цельнокрайних сферических дисков диаметром 460 мм. Диски были собраны в батареи, установленные под углом атаки 10, 20, 30° для работы «вразвал». Общий вид установки в полевых условиях показан на рисунке 8. Две батареи по углу были установлены на встречу друг друга для компенсации силы бокового увода F_y . По оси OX действует сила сопротивления подачи F_x , по оси OZ выглубляющая сила F_z . Сложив три силы, получим результирующий вектор сопротивления движению F_{xyz} .



Рисунок 8. Общий вид дискового культиватора

Figure 8. General view of a disk cultivator

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

В качестве предохранительного механизма на секциях рабочих органов устанавливались пружины.

После прохода дисковых батарей определялась глубина борозды. Данные по глубинам сведены в таблицу 3.

Во время проведения опытов также исследовалось подрезание сорняков. Выбирались учетные площадки, которые имели ширину 1 метр и длину 2 метра.

Таблица 3

Показатели работы дискового культиватора
в полевых условиях

Table 3

Performance of the disk cultivator under field conditions

Угол атаки дисковой батареи, ° Angle of attack of the disk battery, °	Глубина обработки почвы, мм Depth of tillage, mm	
	Левая секция Left section	Правая секция Right section
10	49	31
20	68	57
30	95	88

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Повторность опытов трехкратная. При угле атаки дисковой батареи $\alpha=10^\circ$ степень подрезания сорняков составляла 31,2%, при $\alpha=20^\circ$ – 79,6%, при $\alpha=30^\circ$ – 90,4%.

При полевых исследованиях измеряли результирующий вектор сопротивления движению F_{xyz} , миную раскладывая его на составляющие. Таким образом, у каждой из осциллограмм были выбраны режимы установившейся работы. Их показания были переведены из кг в Н (умножены на 9,81) и приведены к нормированным показателям времени (рис. 9). Среднее значение тягового сопротивления $F_{xyz}=1620,62$ Н при $\alpha=10^\circ$, $F_{xyz}=2762,23$ Н при $\alpha=20^\circ$, $F_{xyz}=3135,82$ Н, при $\alpha=30^\circ$ (рис. 8, 9).

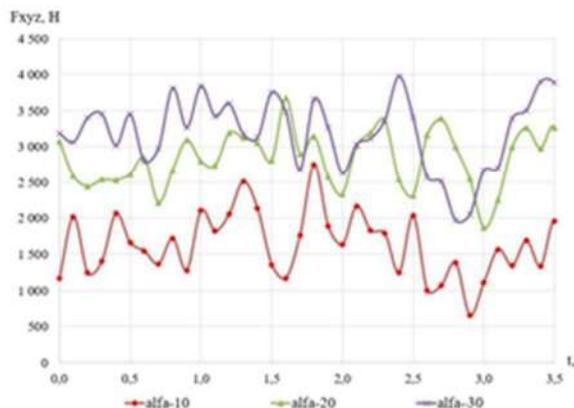


Рисунок 9. Результирующая сила сопротивления F_{xyz} на полевых испытаниях

Figure 9. Resultant drag force F_{xyz} on field tests

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

Определим описательные статистические характеристики проведенных опытов (F_{xyz1} , для $\alpha=10^\circ$; F_{xyz2} , для $\alpha=20^\circ$; F_{xyz3} , для $\alpha=30^\circ$), и сведем их в таблицу 4. На основании средних значений сил, полученных по результатам проведенной статистической обработки, построим их зависимость от углов установки батареи (рис. 10).

Таблица 4

Описательные статистические характеристики F_{xyz}

Table 4

Descriptive statistical characteristics of F_{xyz}

Параметр Parameter	Опыты Experiments		
	F_{xyz1}	F_{xyz2}	F_{xyz3}
Асимметричность Asymmetry	0,26	-0,66	-0,52
Экспесс Excess	-0,02	0,85	-0,32
Уровень надежности (95,0%) Reliability level (95.0%)	147,62	143,36	165,73
Медиана Median	1647,76	2807,56	3185,18
Дисперсия выборки Sample variance	201708,96	206288,42	275692,68
Стандартная ошибка Standard error	72,86	70,93	82,00
Стандартное отклонение Standard deviation	449,12	454,19	525,06
Среднее Average	1620,62	2762,23	3135,82

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

На основе данных таблицы 4 можно сказать, что распределение в целом симметрично (соответствует нормальному).

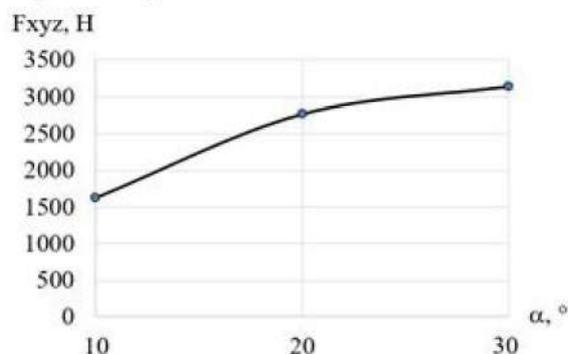


Рисунок 10. Зависимость F_{xyz} от угла установки батарей в полевых условиях

Figure 10. Dependence of F_{xyz} on the angle of battery installation in field conditions

Источник: Собственная композиция автора
Source: Authors' own composition

Из рисунка 10 видно, что с увеличением угла установки дисковых батарей увеличивается их тяговое сопротивление, но, при этом, повышается эффективность работы агрегата.

Данные опытов показывают, что более жесткая пружина обеспечивает более глубокое рыхление почвы, при $\alpha=10^\circ$ на 58%, при $\alpha=20^\circ$ на 19%, при $\alpha=30^\circ$ на 8%. Для обеспечения требуемой и постоянной глубины хода орудия необходимо использовать более жесткие пружины, особенно на малых углах атаки. Также следует предусмотреть возможность установки балластных ящиков для дополнительного заглубления дисков в почву.

Испытания культиватора с двумя ножевыми барабанами.

При проведении полевых испытаний угол поворота ножевого барабана варьировался в пределах $\alpha=0-30^\circ$ (рис. 11). Два катка были установлены на встречу друг друга для компенсации силы бокового увода F_y . По оси OX действует сила сопротивления подачи F_x , по оси OZ выглубляющая сила F_z . Сложив три силы, получим результирующий вектор сопротивления движению F_{xyz} .

В качестве предохранительного механизма на секциях рабочих органов устанавливались пружины. После прохода агрегата с ножевыми катками определялся диаметр поросли и степень ее удаления.



Рисунок 11. Общий вид орудия с двумя ножевыми катками

Figure 11. General view of the implement with two knife rollers

Источник: собственное фото авторов

Source: authors' own photo

Во время проведения опытов исследовалось срезание древесно-кустарниковой растительности. Выбирались учетные площадки, которые имели ширину 1 метр и длину 2 метра. Повторность опытов трехкратная. Степень подрезание травы в зоне обработки 9-42 %. Степень срезания древесно-кустарниковой растительности в зоне обработки 45-61 %. Диаметр срезанной поросли варьировался в пределах 5-21 мм. Наибольший процент срезанной поросли наблюдался при углах установки катков $\alpha=10$ и 20° . При $\alpha=30^\circ$ катки начинали забиваться травянистой растительностью.

Во время полевых исследований сразу фиксировалась результирующая сила F_{xyz} . Таким образом, у каждой из осциллограмм были выбраны режимы установившейся работы. Их показания были переведены из кг в Н (умножены на 9,81) и приведены к нормированным показателям времени (рис. 12). Среднее значение тягового сопротивления $F_{xyz} = 5337,81$ Н при $\alpha=0^\circ$, $F_{xyz} = 3605,51$ Н при $\alpha=10^\circ$, $F_{xyz} = 3380,28$ Н при $\alpha=20^\circ$, $F_{xyz} = 4519,37$ Н, при $\alpha=30^\circ$ (рис. 11, 12).

Определим описательные статистические характеристики проведенных опытов для F_{xyz} и сведем их в таблицу 5.

На основании средних значений сил сопротивлений, полученных по результатам проведенной статистической обработки, построим их зависимость от углов установки катка (рис. 13).

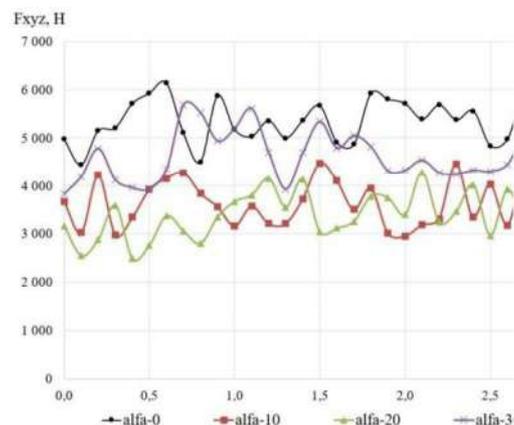


Рисунок 12. Результирующая сила сопротивления F_{xyz} на полевых испытаниях

Figure 12. Resultant drag force F_{xyz} on field tests

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Таблица 5

Описательные статистические характеристики F_{xyz}

Table 5

Descriptive statistical characteristics of F_{xyz}

Параметр Parameter	Опыты Experiments			
	F_{xyz1}	F_{xyz2}	F_{xyz3}	F_{xyz4}
Асимметричность Asymmetry	0,12	0,38	-0,10	0,37
Экссесс Excess	-0,33	-1,11	-0,61	-0,41
Уровень надежности (95,0%) Reliability level (95.0%)	145,12	171,08	153,56	166,78
Медиана Median	5356,97	3563,66	3357,69	4445,91
Дисперсия выборки Sample variance	211389,12	217535,48	236679,44	279198,75
Стандартная ошибка Standard error	71,80	83,77	75,98	82,52
Стандартное отклонение Standard deviation	459,77	466,41	486,50	528,39
Среднее Average	5337,81	3605,51	3380,28	4519,37

Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

На основе данных таблицы 5 можно сказать, что распределение в целом симметрично (соответствует нормальному).

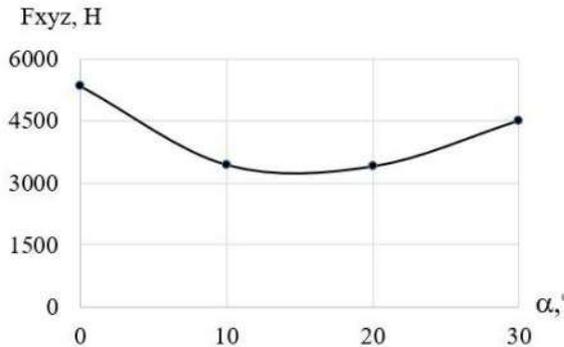


Рисунок 13. Зависимость F_{xyz} от угла установки пары катков в полевых условиях

Figure 13. Dependence of F_{xyz} on the angle of installation of a pair of rollers in field conditions

Источник: Собственная композиция автора
Source: Authors' own composition

Из рисунка 13 видно, что при угле поворота катка $\alpha=0^\circ$ наблюдается самое большое тяговое сопротивление. Далее оно начинает уменьшаться, но после угла $\alpha=20^\circ$ постепенно возрастает. Это объясняется тем, что при прямолинейном движении ($\alpha=0^\circ$) ножи барабана, при каждом своем взаимодействии с почвой и растительными остатками, создают дополнительную динамическую нагрузку (происходят удары), которая передается на тензодатчик. При увеличении угла поворота катка до $\alpha=10-20^\circ$ происходит уменьшение динамической нагрузки, катки работают более плавно. Увеличение тягового сопротивления после угла $\alpha=20^\circ$ связано с тем, что травянистая растительность начинает забиваться между ножевыми барабанами и их стойками, тем самым препятствуя их вращению.

Данные опытов показывают, что необходимо предусмотреть увеличение массы ножевых катков для лучшего перерезания ими поросли за счет заполнения их внутренней полости. Также требуется предусмотреть увеличение зазора между ножевым барабаном и его п-образной стойкой. Это необхо-

димо для исключения забивания крупными древесными включениями и последующего протягивания рабочего органа без вращения.

Наибольшая эффективность орудия достигается при углах установки катков $\alpha=10$ и 20° . При этом наблюдается минимальное тяговое сопротивление и наибольший процент срезанной поросли.

Выводы

Были получены зависимости тягового сопротивления различных рабочих органов в зависимости от конструктивных и технологических параметров установки рабочих органов.

При обработке данных полевых экспериментов силы сопротивления для двух дисковых плужных рабочих органов, достигают средних значений $F_{xyz} = 2569,68$ Н при $\alpha=10^\circ$, $F_{xyz} = 4455,46$ Н при $\alpha=20^\circ$, $F_{xyz} = 5013,20$ Н, при $\alpha=30^\circ$.

При обработке данных полевых экспериментов получены значения силы сопротивления пары дисковых батарейных рабочих органов, которые достигают средних значений $F_{xyz} = 1620,62$ Н при $\alpha=10^\circ$, $F_{xyz} = 2762,23$ Н при $\alpha=20^\circ$, $F_{xyz} = 3135,82$ Н, при $\alpha=30^\circ$.

С увеличением угла установки дисков возрастает глубина обработки почвы, которая, в свою очередь, повышает тяговое сопротивление агрегата.

При обработке данных полевых экспериментов силы сопротивления для двух ножевых катков, достигают средних значений $F_{xyz} = 5337,81$ Н при $\alpha=0^\circ$, $F_{xyz} = 3605,51$ Н при $\alpha=10^\circ$, $F_{xyz} = 3380,28$ Н при $\alpha=20^\circ$, $F_{xyz} = 4519,37$ Н, при $\alpha=30^\circ$.

Полученные результаты применимы к песчаным и супесчаным типам почвы с влажностью 3,5-5,6 %.

На основе полученных экспериментальных данных можно спроектировать комбинированные агрегаты, состоящие из нескольких видов рабочих органов. При этом подбор орудий будет осуществлен исходя из тягового класса трактора. Под определенный класс трактора можно будет подобрать определенное сочетание рабочих органов с требуемыми конструктивными и технологическими параметрами. Такие комбинации позволят в дальнейшем повысить качество и эффективность почвообработки, уменьшат расход топлива при выполнении работ.

Список литературы

1. Ушаков А.Е., Египко С.В. Разработка тензометрической навески для проведения полевых испытаний почвообрабатывающих машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 22. – С. 42-49. – DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-22-42-49>.
2. Малюков С.В., Поздняков Е.В., Шавков М.В., Петков А.Ф., Шанин И.И., Болгов А.В. Анализ современных конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин и агрегатов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 2 (70). – С. 523-534. – DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-61>.
3. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. 2020;19. – DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF175>
4. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022;37-47. – DOI: <https://doi.org/10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741>
5. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021;723:032061. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061>
6. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechydro 2021". 2021;04025. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>.
7. Сучков Д.К., Поташкина Ю.Н. Агротехнический уход за лесными культурами: цель, сроки и число уходов // Промышленность и сельское хозяйство. – 2020. – № 9 (26). – С. 28-35. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44073255&ysclid=llaz91t2mv34353766>.
8. Лисунов О.В., Богиня М.В., Васильев А.А., Олейникова Е.Н. Исследование влияния параметров рабочих органов и режимов работы культиватора модульного типа на качество поверхностной обработки почвы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1 (61). – С. 190-196. – DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2023-1-190-196>
9. Малюков С.В., Поздняков Е.В., Дегтярева С.И., Шавков М.В., Малюкова М.А., Шанин И.И., Арико С.Е. Эксплуатация почвообрабатывающих орудий в условиях нераскорчеванных вырубок европейской части России: анализ препятствий в виде пней и корней // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 96-113. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/7>
10. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин // Энергия: экономика, техника, экология. – 2020. – № 1. – С. 55-63. – DOI: <https://doi.org/10.7868/S0233361920010085>.
11. Бойков В.М., Старцев С.В., Воротников И.Л., Нарушев В.Б. Классификация машин для полосовой технологии обработки почвы // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 5. – С. 72-76. – DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i5pp72-76>
12. Догеев Г.Д., Халилов М.Б. Ресурсосберегающие влагонакопительные агроприемы и машины // Проблемы развития АПК региона. – 2021. № 1 (45). – С. 43-50. – DOI: https://doi.org/10.52671/20790996_2021_1_43
13. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. The Natural Recovery of Disturbed Soil, Plant Cover and Trees after Clear-Cutting in the Boreal Forests, Russia. iForest – Biogeosciences and Forestry. 2020;13(6):531-540. – DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3371-013>
14. Жук А.Ф., Халилов М.Б., Абдулнатилов М.Г. Технологии, приемы и технические средства для ресурсосберегающей обработки почвы // Проблемы развития АПК региона. – 2020. – № 4 (44). – С. 52-58. – DOI: <https://doi.org/10.15217/issn2079-0996.2020.3.52>

15. Раднаев Д.Н., Дамбаева Б.Е. Повышение эффективности работы комбинированных машин и комплексов // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 1 (80). – С. 55-60. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44874751&ysclid=llay1qq5oc976265711>.

16. Яхин С.М., Алиакберов И.И., Нуриев Л.М., Яруллин Ф.Ф. Кинематика игольчатого эллипсоидного диска ротационного почвообрабатывающего орудия // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 2 (272). – С. 12-15. – DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-2-12-15>

17. Халилов М.Б., Халилова К.М., Халилова М.М. Сравнительная оценка приемов и машин для обработки почвы // Известия Дагестанского ГАУ. – 2022. – № 3 (15). – С. 37-43. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49514137&ysclid=llay4og2pc154486540>.

18. Тарасенко Б.Ф., Руднев С.Г., Дробот В.А. Универсальный почвообрабатывающий агрегат для малоземельных фермерских хозяйств // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2021. – № 174 (10). – С. 113-129. – DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-174-012>

19. Малюков С. В., Лысыч М. Н., Бухтояров Л. Д., Поздняков Е. В., Гнусов М. А., Шавков М. В., Петков А. Ф. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – 2 (50). – С. 128-141. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>

20. Малюков С.В., Бухтояров Л.Д., Лысыч М.Н., Шавков М.В., Поздняков Е.В., Петков А.Ф. Метод динамики частиц: моделирование комбинированного почвообрабатывающего орудия, применяемого при лесовосстановлении и защите леса // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – № 245. – С. 215-234. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.215-234>

References

1. Ushakov A.E., Egipko S.V. *Razrabotka tenzometricheskoj naveski dlja provedenija polevyh ispytaniy pochvoobrabatyvajushhih mashin* [Development of a strain gauge attachment for field testing of reclamation machines]. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo = Transportation, mining and construction engineering: science and production*, 2023; 22: 42-49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-22-42-49>.

2. Malyukov S. V., Pozdnyakov E. V., Shavkov M. V., Petkov A. F., Shanin I. I., Bolgov A. V. *Analiz sovremennykh konstrukcij kombinirovannykh pochvoobrabatyvajushhih mashin i agregatov* [Analysis of modern designs of combined tillage machines and units]. *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of lower Volga agro-university complex: science and higher education*, 2023; 2(70): 523-534. (.). DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-02-61>.

3. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. *Development of combined tillage tool for melon cultivation*. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings, 2020; 19. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF175>

4. Zhirnov A. *Construction of active working machines for the care of seed-lings*. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA, 2022; 37-47. DOI: <https://doi.org/10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741>

5. Kalinin A. B., Novikov M. A., Ruzhev V. A., Teplinsky I.Z. *Improving the efficiency of the soil uncompacton by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021; 723: 032061. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061>

6. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. *Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation*. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechydro 2021", 2021; 04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>.

7. Suchkov D. K., Potashkina Yu. N. *Agrotehnicheskij uhod za lesnymi kul'turami: cel', sroki i chislo uhodov* [Agrotechnical care for forest crops: purpose, timing and number of care]. *Promyshlennost i selskoe hozjajstvo = Industry*

and agriculture, 2020; 9(26): 28-35. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44073255&ysclid=llaz91t2mv34353766>.

8. Lisunov O. V., Boginya M. V., Vasiliev A. A., Oleynikova E. N. *Issledovanie vlijanija parametrov rabochih organov i rezhimov raboty kul'tivatora modul'nogo tipa na kachestvo poverhnostnoj obrabotki pochvy* [Study of the influence of the parameters of working bodies and operating modes of a modular cultivator on the quality of surface tillage]. *Vestnik Uljanovskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii = Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2023; 1 (61): 190-196. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2023-1-190-196>

9. Malyukov S. V., Pozdnyakov E. V., Degtyareva S. I., Shavkov M. V., Malyukova M. A., Shanin I. I., Ariko S. E. *Jekspluatacija pochvoobrabatyvajushhijh orudij v uslovijah neraskorchevannyh vyrubok evropejskoj chasti rossii: analiz prepjatsvij v vide pnej i kornej* [Operation of soil-cultivating implements in conditions of non-uprooted clearings in the European part of Russia: analysis of obstacles in the form of stumps and roots]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*, 2022; 4 (48): 96-113. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/7>

10. Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. *Puti povyshenija jeffektivnosti raboty lesnyh mashin* [Ways to improve the efficiency of forest machines]. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija = Energy: economics, technology, ecology*, 2020; 1: 55-63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0233361920010085>.

11. Boikov V. M., Startsev S. V., Vorotnikov I. L., Narushev V. B. *Klassifikacija mashin dlja polosovoj tehnologii obrabotki pochvy* [Classification of machines for strip technology of tillage]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = Agrarian scientific journal*, 2020; 5: 72-76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i5pp72-76>

12. Dogeev G. D., Khalilov M. B. *Resursosberegajushhie vlagonakopitel'nye agropriemy i mashiny* [Resource-saving moisture-accumulating agricultural techniques and machines]. *Problemy razvitiya APK regiona = Problems of development of the regional agro-industrial complex*, 2021; 1 (45): 43-50. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52671/20790996_2021_1_43

13. Ilintsev A., Bogdanov A., Nakvasina E., Amosova I., Koptev S., Tretyakov S. *The Natural Recovery of Disturbed Soil, Plant Cover and Trees after Clear-Cutting in the Boreal Forests, Russia*. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2020; 13(6): 531-540. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3371-013>

14. Zhuk A. F., Khalilov M. B., Abdulnatipov M. G. *Tehnologii, priemy i tehicheskie sredstva dlja re-sursosberegajushhej obrabotki pochvy* [Technologies, techniques and technical means for resource-saving tillage]. *Problemy razvitiya APK regiona = Problems of development of the agro-industrial complex of the region*, 2020; 4(44): 52-58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15217/issn2079-0996.2020.3.52>

15. Radnaev D. N., Dambaeva B. E. *Povyshenie jeffektivnosti raboty kombinirovannyh mashin i kompleksov* [Improving the efficiency of combined machines and complexes]. *Vestnik VSGUTU = Bulletin of the ESSTU*, 2021; 1(80): 55-60. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44874751&ysclid=llaylqq5oc976265711>.

16. Yakhin S. M., Aliakberov I. I., Nuriyev L. M., Yarullin F. F. *Kinematika igol'chatogo jellipsovidnogo diska rotacionnogo pochvoobrabatyvajushhego orudija* [Kinematics of a needle-shaped elliptical disk of a rotary tillage implement]. *Tehnika i oborudovanie dlja sela = Machinery and equipment for the village*, 2020; 2 (272): 12-15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-2-12-15>

17. Khalilov M. B., Khalilova K. M., Khalilova M. M. *Sravnitel'naja ocenka priemov i mashin dlja obrabotki pochvy* [Comparative evaluation of techniques and machines for tillage]. *Izvestija Dagestanskogo GAU = Proceedings of the Dagestan State Agrarian University*, 2022; 3(15): 37-43. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49514137&ysclid=llay4og2pc154486540>.

18. Tarasenko B. F., Rudnev S. G., Drobot V. A. *Universal'nyj pochvoobrabatyvajushhij agregat dlja malozemel'nyh fermerskih hozjajstv* [Universal tillage unit for small-scale farms]. *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2021; 174: 113-129. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-174-012>

19. Malyukov S. V., Lysych M. N., Buhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. *Analiz diskovykh rabochih organov lesnykh pochvoobrabatyvayushchih orudij*. [Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering journal*, 2023; 2 (50): 128-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>

20. Malyukov S. V., Bukhtoyarov L. D., Lysych M. N., Shavkov M. V., Pozdnyakov E. V., Petkov A. F. *Metod dinamiki chastic: modelirovanie kombinirovannogo pochvoobrabatyvayushhego orudija, primenjaemogo pri lesovostanovlenii i zashhite lesa* [Particle dynamics method: simulation of a combined tillage tool used in reforestation and forest protection]. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*, 2023; 245: 215-234. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.215-234>

Сведения об авторах

✉ *Малюков Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru.

Лысыч Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru

Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru

Шавков Михаил Викторович – кандидат технических наук, специалист по снабжению ООО «Русгидроком», ул. Мазлумова, д. 25, г. Воронеж, Российская Федерация, 394040, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3700-7508>, e-mail: shavkovmv@mail.ru

Петков Александр Федорович – кандидат технических наук, инженер кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: alexanderpetkoff@mail.ru

Попов Максим Александрович – преподаватель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6356-5028>, e-mail: porovmaxim98@mail.ru.

Черенков Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-1257-6902>, e-mail: chierienkov1999@mail.ru

Information about authors

✉ *Sergey V. Malyukov* – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

Mikhail N. Lysych – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Технологии. Машины и оборудование

Leonid D. Bukhtoyarov – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vgltamlx@yandex.ru

Mikhail V. Shavkov – Cand. Sci. (Tech.), Procurement Specialist RusHydrocom LLC, Mazlumova str., 25, Voronezh, Russian Federation, 394040, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3700-7508>, e-mail: shavkovmv@mail.ru

Aleksandr F. Petkov – Cand. Sci. (Tech.), Engineer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: alexanderpetkoff@mail.ru.

Maksim A. Popov – Lecturer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>, e-mail: popovmaxim98@mail.ru.

Dmitriy S. Cherenkov – Post-graduate student (Tech.), Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1257-6902>, e-mail: chierienkov1999@mail.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author



Материальная оценка стволов сосны (*Pinus sylvestris* L.) Костромской области

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

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

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

Дарья Ю. Гостева, d.gosteva@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>

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

Аннотация

Рассмотрены основные исторические этапы развития лесотаксационных нормативов для оценивания сортиментной структуры древостоев Костромской области. Обзор современной отечественной и зарубежной литературы показывает, что актуальным методом сортиментной оценки является применение уравнений образующей древесного ствола. Уравнения образующей позволяют учитывать региональные особенности формирования стволов основных лесообразующих пород и адекватно предсказывать изменение диаметра с высотой, что позволяет производить качественную оценку материальной структуры и выхода сортиментов. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) относится к одной из основных лесообразующих пород Костромской области и выступает источником ценных сортиментов, точность учёта которых оказывает существенное влияние на экономическую эффективность ведения лесного хозяйства региона. Анализ развития и применяемых в практике ведения лесного хозяйства методов сортиментной и материальной оценки стволов в Костромской области показывает, что отсутствуют региональные нормативы, отвечающие современным требованиям. Поэтому целью исследования является оценка материальной структуры стволов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Костромской области с использованием уравнения образующей и разработка на базе полученной модели новых лесотаксационных нормативов. По данным анализа стволов сосны, произрастающих в Костромской области, на основании численного интегрирования образующей древесного ствола произведен расчёт выхода деловой древесины различных категорий крупности, дров и отходов. Для оценки качества моделирования использованы общепринятые метрики соответствия: квадратный корень из среднеквадратической ошибки (*RMSE*), средний процент абсолютной ошибки (*MAPE*), средняя абсолютная ошибка (*MAE*), ошибка среднего смещения (*MBE*) и коэффициент детерминации (R^2). Предложена методика моделирования материальной структуры стволов деревьев сосны, базирующаяся на использовании уравнения образующей ствола. С применением модели образующей получены таблицы материальной оценки стволов сосны Костромской области. Сопоставление полученных данных с действующими лесотаксационными нормативами показало, что применение модели позволяет повысить точность учёта крупной деловой древесины высших разрядов высот до 30%. При этом корректируются значения выхода средней и мелкой деловой древесины, а также дров и отходов, что приведёт к более рациональному использованию сосновых стволов и будет способствовать повышению доходности ведения лесного хозяйства в регионе. Применение предложенной методики в сочетании с современными цифровыми технологиями будет способствовать упрощению процедуры материальной оценки лесосечного фонда и сокращению финансовых и временных затрат на ее проведение.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сортиментные таблицы, сортиментация, основные древостои, образующая ствола, Костромская область, таблицы материальной оценки

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

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

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Материальная оценка стволов сосны (*Pinus sylvestris* L.) Костромской области / Н. Н. Дубенок, А. В. Лебедев, В. В. Гостев, Д. Ю. Гостева // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т.15. – № 2 (58). – С. 224-246. – Библиогр.: с. 240-245 (41 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/14>.

Поступила 26.11.2024. Пересмотрена 07.04. 2025. Принята 26.05. 2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.

Article

Material assessment of Pine trunks (*Pinus sylvestris* L.) in Kostroma region

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

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

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

Daria Yu. Gosteva, d.gosteva@rgau-msha.ru  <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>

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

Abstract

The main historical stages in the development of forest inventory standards for evaluating the timber assortment structure of forest stands in the Kostroma region have been examined. A review of modern domestic and international literature indicates that the most relevant method for timber assortment assessment is the use of stem taper equations. These equations account for regional characteristics in the formation of trunks of primary forest-forming species and reliably predict changes in diameter along the height of the tree, enabling a qualitative evaluation of the material structure and yield of timber assortments. Scot's pine (*Pinus sylvestris* L.) is one of the principal forest-forming species in the Kostroma region and a source of valuable timber assortments. The precision of their estimation significantly affects the economic efficiency of forest management in the region. An analysis of the methods currently used in forest management practices for timber assortment and material assessment of tree trunks in the Kostroma region reveals a lack of regional standards that meet modern requirements. Therefore, the objective of this study is to assess the material structure of Scots pine trunks in the Kostroma region using stem taper equations and to develop new forest inventory standards based on the resulting model. Using data from the analysis of pine trunks grown in the Kostroma region, the yield of merchantable wood (categorized by size), firewood, and waste was calculated through numerical integration of the stem taper equation. To evaluate the quality of the modeling, widely accepted metrics were employed: Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Mean Absolute Error (MAE), Mean Bias Error (MBE), and the Coefficient of Determination (R^2). A methodology for modeling the material structure of pine tree trunks was proposed, based on the stem taper equation. Using this model, tables for the material assessment of pine trunks in the Kostroma region were developed. A comparison of the results with current forest inventory standards demonstrated that the application of the stem taper model improves the accuracy of accounting for high-quality large-diameter merchantable wood by up to 30%. Additionally, adjustments were made to the estimated yields of medium and small merchantable wood, firewood, and waste. These

refinements will enable more rational utilization of pine trunks and enhance the profitability of forest management in the region. The proposed methodology, combined with modern digital technologies, will streamline the material assessment of forest resources and reduce the financial and time costs associated with its implementation.

Keywords: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), timber assortment tables, product specification, pine stands, stem taper, Kostroma region, material assessment tables.

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

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

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

For citation: Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gostev V. V., Gosteva D. Yu. (2025). Material assessment of Pine trunks (*Pinus sylvestris* L.) in Kostroma region. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 224-246 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/14>.

Received 26.11.2024. *Revised* 07.04.2025. *Accepted* 26.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

Костромская область занимает второе место по площади в Центральном федеральном округе Российской Федерации, а лесистость региона по данным Федерального агентства лесного хозяйства составляет 74,1 %. К главным лесообразующим породам относится сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), круглая древесина и продукты переработки которой пользуются значительным спросом на рынке. Экономика региона на протяжении длительного времени неразрывно связана с ведением лесного хозяйства и лесопромышленным комплексом [1], повышение эффективности которых требует проведения научных исследований и внедрения разработок.

Леса Костромской области являются источником высококачественной древесины. Еще в середине XIX века в пойме реки Унжа, в окрестностях города Макарьева, были выделены корабельные рощи, а сосновые леса взяты под надзор Лесным ведомством. Помимо нужд флота высокотоварная древесина требовалась во многих отраслях хозяйства – от строительства зданий и железных дорог до изготовления предметов быта, искусства и музыкальных инструментов, а отходы деревообработки шли на дрова [2].

Возросшие в XIX веке объемы заготовки древесины требовали её учёта, качество и точность методов которого в Костромской области изменялись

с развитием лесной науки. Необходимы были нормативы, применение которых позволяло оценивать запас спелого леса на корню и проводить анализ его сортиментной структуры. Первые упоминания о сортиментных таблицах для лесов региона относятся к материалам для оценки земель Костромской губернии, опубликованным в 1908 году [3]. Входом в таблицы являлись порода и возраст, а запас древесины подразделялся на строевую и дровяную части, выраженные в процентах. Нормативы были составлены для хвойных пород (сосна и ель), а с увеличением возраста древостоев в них прослеживаются несогласованность в изменении процента выхода строевой древесины. Соотношения между строевой и дровяной древесиной в таблицах не могли считаться достаточно обоснованными и использовались в качестве приержек при оценивании сортиментной структуры древостоев.

В период с 1908 по 1917 годы А.А. Крюденером были составлены и опубликованы массовые таблицы и таблицы сбega для основных лесообразующих пород европейской части России [4-6], территорией применения которых была и Костромская губерния. Входом в таблицы были такие показатели, как древесная порода, лесорастительная область, тип местообитания, тип деревьев. А.А. Крюденером впервые в нашей стране был создан наиболее полный набор таксационных нормативов для подеревного отпуска леса.

Природопользование

В 1914 году опубликованы таблицы сортиментов древесины для казенных лесных дач Костромской губернии [7]. В них впервые объём строевого леса был подразделён на категории крупности, применяемые и в настоящее время: крупная, средняя и мелкая древесина. Входом в таблицы являлись разряд массовых таблиц, порода и диаметр на высоте груди [8]. В 1925 году таблицы сортиментов были дополнены, переизданы и утверждены на расширенном техническом совещании при Костромском гублесотделе [9].

К 1927 году, когда М.М. Орловым была разработана новая классификация сортиментов для учёта леса на корню, в Костромской губернии была установлена следующая градация сортиментов: крупные – бревна в верхнем отрубе в коре диаметром 31 см и выше при длине не менее 4,3 м; средние – брёвна диаметром в верхнем отрубе 22-30 см и длиной 4,3 м от комля; мелкие – при диаметре в верхнем отрубе 13-21 см и длине 4,3 м [10].

В 1929 году Костромской гублесотдел для расчёта выхода крупной, средней и мелкой древесины утвердил новые нормативы по выделению сортиментов, в основу которых легли таблицы А.А. Крюденера - М.К. Турского [11]. Входом являлись длина бревна и диаметр в верхнем отрезе. Объём и выход древесины различных категорий крупности в таблицах приводился для брёвен длиной от 2 до 11 м с диаметром от 4 до 32 см. По правилам отпуска леса в Костромской губернии для учёта брёвен, длина которых превышала 11 метров, производилось измерение диаметра на 11 метрах и в верхнем отрезе, после чего общий объём определялся сложением объёмов комлевой и вершинной частей.

В 1929 году Костромская губерния была упразднена, большая часть территории вошла в состав Ивановской промышленной и Горьковской областей. В 1944 году создана Костромская область в современных границах [12]. В 1920-1930 годы предпринимаются попытки приведения нормативов для оценки выхода сортиментов, заготавливаемых в различных частях РСФСР, к единому виду. В этот период Ю.Н. Полянским составлен краткий справочник лесоустроителя, включающий таблицы объёмов

и товаризации леса [13]. В справочнике, который переиздавался несколько раз, содержались критерии для разделения стволов на категории технической годности и их объёмы для основных лесообразующих пород.

К 1930 году в СССР остро встала проблема стандартизации сортиментных нормативов. В разных губерниях применялись несопоставимые между собой критерии для выделения и исчисления сортиментов. Отсутствие предварительного согласования при установлении размеров и процента выхода сортиментов привело к существенным различиям понятий крупной, средней и мелкой древесины. Решением этой задачи занимался Н.П. Анучин, исследования которого были направлены на рационализацию использования древесных ресурсов и увеличение доходности ведения лесного хозяйства. Учёным составлены сортиментные и товарные таблицы по единому принципу для всей территории СССР, которые применялись на практике ни одно десятилетие и выдержали семь переизданий (первое вышло в 1931 году [14], а седьмое, переработанное и дополненное, в 1981 [15]).

Н.П. Анучиным разработаны таблицы материальной оценки лесосек для основных лесообразующих пород, входом в которые являлись разряд высот, диаметр на высоте 1,3 м и высота. Рассчитаны объёмы стволов в коре и без нее, выход крупной (от 25 см в верхнем отрезе), средней (от 14 до 24 см) и мелкой (до 13 см) древесины, а также дров и отходов. Непосредственно сортиментные таблицы Н.П. Анучина включали сведения о выходе из деловых стволов основных лесообразующих пород таких пиломатериалов установленного образца, как пиловочник, шпальник, строительное бревно, балансы, рудничные стойки, а также технологического сырья, дров и отходов.

В 1986 году результатом обобщения В.В. Загреевым и А.Ф. Барановым работ по сортиментации лесных насаждений стало издание сортиментных и товарных таблиц для лесов центральных и южных районов Европейской части РСФСР [16]. Входом в нормативы служат разряды высот. По таблицам можно установить общий запас деловой древесины с подразделением на классы крупности, выход основных пиломатериалов установленного образца, технологического сырья, дров и отходов как в объёмных, так и в относительных величинах. Составленные в соответствии с государственными отраслевыми стандартами эти нормативы применяются и в настоящее время при материально-денежной оценке лесосек Костромской области.

Шкалы разрядов высот, которые выступают входом в действующие сортиментные таблицы и таблицы материально-денежной оценки лесосек обладают рядом недостатков, что приводит к значительным неточностям при обосновании региона допустимого применения нормативов и оценивании выхода деловой древесины различной крупности, а также дров и отходов [17]. Оценку объёма стволов деревьев и выхода древесины в современных условиях наиболее эффективно выполнять с помощью математических зависимостей [18-21].

Актуальным является вопрос создания новых нормативов для сортиментации древостоев основных лесобразующих пород, учитывающих региональные особенности их роста и развития, применение которых будет способствовать увеличению эффективности использования древесных стволов, получению ценных сортиментов и снижению объёма отходов при раскряжёвке [22-24]. Основой для таких нормативов могут стать уравнения образующей, с большой точностью отражающие изменения диаметра и формы древесного ствола с высотой [25-32].

$$d_i = \sqrt{D^2 \left(\frac{H-h_i-1,904+1,904 \exp\left(-\frac{(H-h_i)}{1,904}\right)+0,578(H-h_i) \exp\left(-\frac{h_i}{0,471}\right)}{H-1,3-1,904+1,904 \exp\left(-\frac{(H-1,3)}{1,904}\right)+0,578(H-1,3) \exp\left(-\frac{1,3}{0,471}\right)} \right)}, \quad (1)$$

где d_i – диаметр дерева на высоте h_i , см; D – диаметр дерева на высоте 1,3 м, см; H – высота дерева, м.

Критерии выделения деловой древесины, дров и отходов. К деловым относились сортименты, диаметр которых в верхнем отрезе составлял от 3 см. К дровам и отходам – отрезки ствола с диаметром до 3 см, верхинка и кора. По толщине в верхнем отрезе

Уравнения образующей позволяют оценивать объём как всего хлыста, так и отдельных сортиментов различной длины за счёт получения сведений о диаметре в коре или без коры на любой высоте [33-34]. Кроме того, уравнения образующей стволов можно использовать для составления сортиментных таблиц на основании длины отдельных хлыстов или конкретных пороговых значений диаметра [35-37].

Анализ развития и применяемых в практике ведения лесного хозяйства методов сортиментной и материальной оценки стволов в Костромской области показывает, что отсутствуют региональные нормативы, отвечающие современным требованиям. Поэтому **цель исследования** – анализ материальной структуры стволов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Костромской области с использованием уравнения образующей и разработка на базе полученной модели новых лесотаксационных нормативов для материальной оценки.

Материалы и методы

Модель образующей древесного ствола. Расчет значений диаметров от комля к вершине для определения выхода деловой древесины различных категорий крупности, дров и отходов производилось с помощью уравнения (1), предложенного в работах О. Garcia [38]. Оценка его параметров выполнена ранее при моделировании образующей древесного ствола сосны Костромской области [28, 29]. Для нахождения значений диаметров без коры применялось уравнение $y = 0,9379x + 0,121$ (где y – диаметр без коры, см; x – диаметр в коре, см) [28]. По этим уравнениям методом численного интегрирования образующей древесного ствола вычислялись объёмы деловой древесины, дров и отходов.

деловая древесина в соответствии с постановлением Правительства РФ от 22 мая 2007 г. № 310 «О ставках платы за единицу объёма лесных ресурсов и ставках платы за единицу площади лесного участка,

Природопользование

находящегося в федеральной собственности» распределялась по категориям крупности. К мелкой относились лесоматериалы от 3 до 12 см включительно, к средней – от 13,0 до 24,0 см и к крупной от 25,0 см.

Верификация модели. Для верификации модели использованы данные сортиментации 690 древесных стволов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Костромской области. Подробная характеристика выборки показана в работе [28]. Набор данных характеризует господствующие и согосподствующие деревья в сосновых древостоях мезофильных и мезо-гигрофильных боров, суборей и сложных суборей, которые относятся к типичным условиям произрастания сосны в регионе.

Оценка соответствия рассчитанных по модели значений выхода деловой древесины, дров и отходов фактическим данным производилось с использованием общепринятых критериев: квадратный корень из среднеквадратической ошибки (*RMSE*), средний процент абсолютной ошибки (*MAPE*), средняя абсолютная ошибка (*MAE*), ошибка среднего смещения (*MBE*) и коэффициент детерминации (R^2) [39]. Формулы для расчёта метрик представлены в таблице 1.

Вычисления производились в Python с библиотеками Pandas, NumPy, SciPy; с использованием авторских программ [40, 41] и Microsoft Office Excel 2016.

Таблица 1

Формулы для расчёта применяемых метрик соответствия

Table 1

Formulas for calculating the applicable compliance metrics

№	Наименование метрики/Name of the metric	Формула/ Formula
1	Квадратный корень из среднеквадратической ошибки (<i>RMSE</i>)/ The square root of the standard error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$
2	Средний процент абсолютной ошибки (<i>MAPE</i>)/ Average percentage of absolute error	$MAPE = 100 \times \sum \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right / n$
3	Средняя абсолютная ошибка (<i>MAE</i>)/ Average absolute error	$MAE = \frac{\sum y_i - \hat{y}_i }{n}$
4	Ошибка среднего смещения (<i>MBE</i>)/ Average offset error	$MBE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{n}$
5	Коэффициент детерминации (R^2)/ Coefficient of determination	$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$

Примечание: k – количество параметров модели; n – количество наблюдений; y_i – фактическое значение; \hat{y}_i – предсказанное по модели значение;

Источник: систематический поиск авторов

Source: systematic search for authors

Результаты

Анализ качества модели. Соотношение рассчитанных и фактических значений выхода крупной, средней и мелкой деловой древесины, дров и отходов представлено на рисунке 1. Для всех категорий древесины характерно равномерное размещение точек вдоль линии тренда. Между рассчитанными и фактическими значениями объемов прослеживается высокая степень соответствия. Минимальный разброс точек фактических и предсказанных значений характерен для таких признаков, как

объём крупной деловой древесины и объём дров и отходов. Значения коэффициентов детерминации (для крупной деловой древесины $R^2 = 0,977$, для средней деловой древесины $R^2 = 0,962$, для мелкой деловой древесины $R^2 = 0,846$, для дров и отходов $R^2 = 0,973$) демонстрируют хорошее соответствие предсказанных с применением уравнения образующей значений фактическим данным.

Метрики соответствия между фактическими и предсказанными значениями выхода деловой древесины, дров и отходов в объёмных величинах пред-

Природопользование

ставлены в таблице 2. Наименьшее значение расхождения $RMSE = 0,010$ имеет объём мелкой деловой древесины, а наибольшее ($RMSE = 0,112$) получено для крупной деловой древесины. Близость значений средней абсолютной ошибки и ошибки среднего смещения к нулю для всех рассматриваемых признаков указывают на хорошее соответствие модели набору данных. Коэффициенты детерминации рассматриваемых признаков находятся в пределах от 0,843 (объём мелкой деловой древесины) до 0,974 (дрова и отходы), что указывает на достаточно хорошее качество модели. Значения среднего процента абсолютной ошибки расположились в пределах от 12,491% (объём дров и отходов) до 22,081% (средняя деловая древесина). Значительные расхождения между фактическими и предсказанными значениями объясняются наличием у данной метрики соответствия артефакта, который проявляется в существенном завышении значений при сравнении объёмов стволов, близких к нулевой отметке и не имеющих хозяйственного значения.

Метрики качества, рассчитанные для фактических и предсказанных значений выхода древесины, выраженного в процентах от объема ствола, представлены в табл. 3. Значения $RMSE$ расположились в промежутке от 1,232 (выход дров и отходов) до 5,610 (средняя деловая древесина). Значения MBE указывают на наличие незначительного завышения предсказанных значений для выхода крупной (-0,165) и мелкой (-0,694) деловой древесины, а также

дров и отходов (-0,070). Значения $MAPE$ для крупной и средней деловой древесины, дров и отходов расположились в диапазоне от 6,806 (дрова и отходы) до 21,012 % (средняя деловая древесина). Доля объяснённой дисперсии для деловой древесины располагается в диапазоне от 0,956 до 0,985. Незначительная величина коэффициента детерминации для дров и отходов (0,470) объясняется наличием расхождений в несколько десятичных знаков между отдельными фактическими и предсказанными значениями данного признака, что вызывает занижение коэффициента детерминации, не оказывая при этом существенного воздействия на общую оценку качества моделирования.

Проведённое сопоставление фактических и предсказанных значений показало, что применение уравнения образующей древесного ствола сосны позволяет оценивать выход крупной, средней и мелкой деловой древесины, а также дров и отходов с достаточной точностью как в объёмных, так и в относительных величинах.

Новые нормативы материальной оценки стволов сосны. С применением уравнения образующей древесного ствола (1) составлена таблица для материальной оценки стволов сосны Костромской области, отражающая выход крупной, средней и мелкой деловой древесины, а также дров и отходов (табл. 4). Входом в таблицу являются диаметр на высоте 1,3 м и высота дерева. Предлагаемая таблица может применяться для деревьев с таксационными диаметрами от 8 до 80 см и высотой от 8 до 40 м.

Природопользование

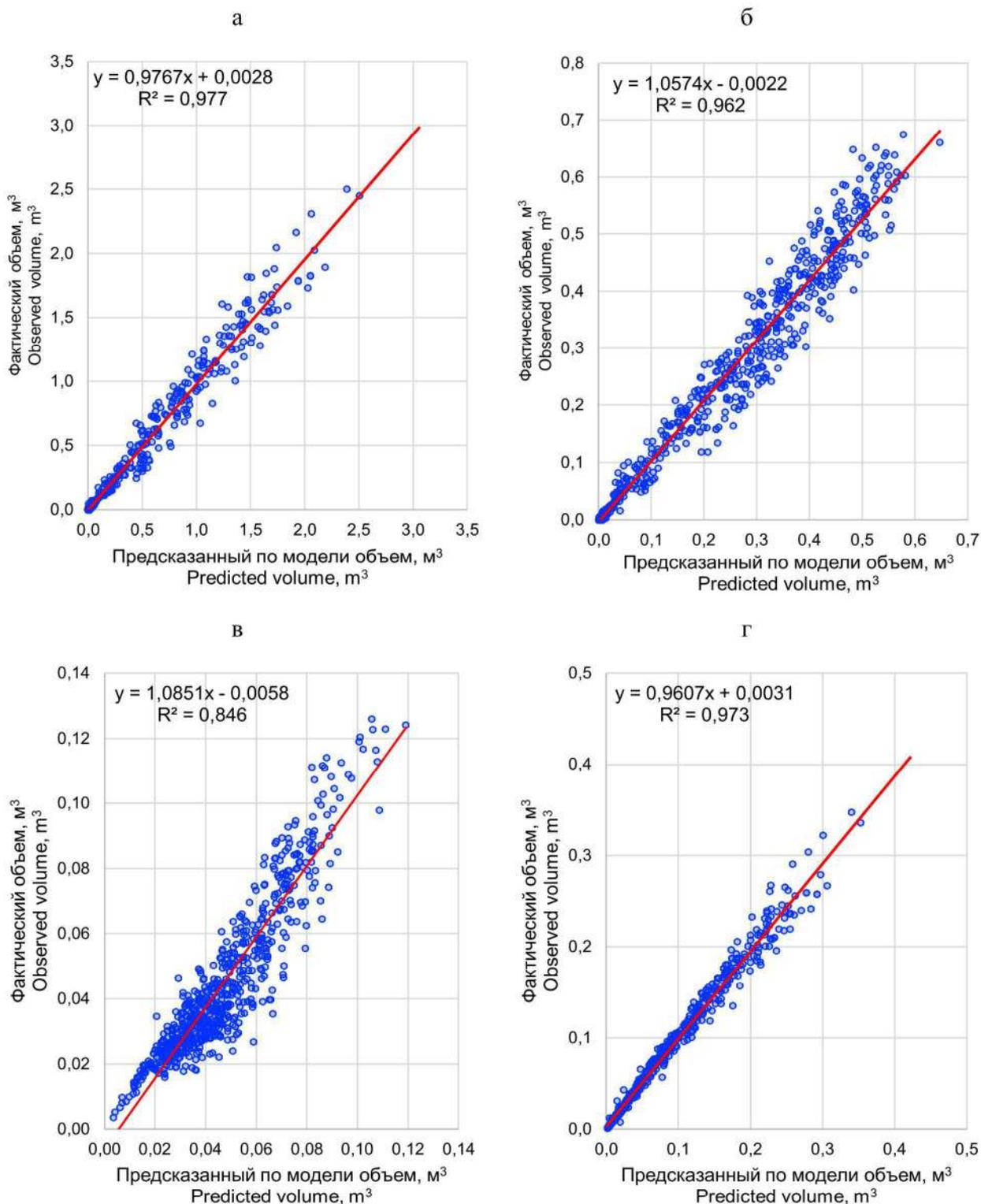


Рисунок 1. Соотношение рассчитанных и фактических значений: а) объёма крупной деловой древесины, б) объёма средней деловой древесины, в) объёма мелкой деловой древесины, г) объёма дров и отходов
Figure 1. Ratio of calculated and actual values: а) volume of large wood commodity, б) volume of medium wood commodity, в) volume of small wood commodity, г) volume of firewood and waste

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Природопользование

Таблица 2

Метрики соответствия фактических и предсказанных значений выхода деловой древесины, дров и отходов в объёмных величинах

Table 2

Metrics for compliance of actual and predicted values of wood commodity, firewood and waste yield in volumetric quantities

Показатель Indicator	<i>RMSE</i>	<i>MBE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	R^2
Объём крупной деловой древесины, м ³ Volume of large wood commodity, m ³	0,112	-0,009	0,072	21,104	0,966
Объём средней деловой древесины, м ³ Volume of medium wood commodity, m ³	0,043	0,012	0,031	22,081	0,952
Объём мелкой деловой древесины, м ³ Volume of small wood commodity, m ³	0,010	-0,002	0,007	18,622	0,843
Объём дров и отходов, м ³ Volume of firewood and waste, m ³	0,012	0,000	0,006	12,491	0,974

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Таблица 3

Метрики соответствия фактических и предсказанных значений выхода деловой древесины, дров и отходов в относительных величинах

Table 3

Metrics for compliance of actual and predicted values of wood commodity, firewood and waste yield in relative values

Показатель Indicator	<i>RMSE</i>	<i>MBE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	R^2
Объём крупной деловой древесины, % Volume of large wood commodity, %	4,696	-0,165	3,198	17,767	0,972
Объём средней деловой древесины, % Volume of medium wood commodity, %	5,610	1,152	4,096	21,012	0,956
Объём мелкой деловой древесины, % Volume of small wood commodity, %	4,325	-0,694	2,546	20,728	0,985
Объём дров и отходов, % Volume of firewood and waste, %	1,232	-0,070	0,278	6,806	0,470

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Природопользование

Диаметр на высоте 1,3 м, см Diameter at height 1.3 m, cm	Объём средней деловой древесины, м ³ , при высоте, м Volume of medium wood commodity m ³ , at height, m																																						
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40						
10	0,04990	0,02630	0,01020	0,0016																																			
12	0,10300	0,08090	0,05240	0,02590	0,00920	0,0009																																	
14	0,14860	0,11370	0,08670	0,05520	0,02580	0,0085																																	
16	0,16920	0,12430	0,09280	0,05820	0,02570	0,0079																																	
18	0,15180	0,10950	0,08360	0,05480	0,02560	0,0074																																	
20	0,16710	0,12100	0,09110	0,05550	0,02560	0,0071																																	
24	0,18260	0,13080	0,09600	0,06130	0,02570	0,0067																																	
28	0,15960	0,10920	0,08200	0,05500	0,02570	0,0065																																	
32	0,14210	0,10180	0,07660	0,05350	0,02580	0,0062																																	
36	0,12840	0,09190	0,06600	0,04290	0,02590	0,0060																																	
40	0,13640	0,09630	0,06300	0,04200	0,02590	0,0058																																	
44	0,12410	0,09160	0,06300	0,04200	0,02590	0,0057																																	
48	0,14450	0,10160	0,07660	0,05220	0,02600	0,0055																																	
52	0,13080	0,09150	0,06700	0,04200	0,02600	0,0055																																	
56	0,14860	0,10170	0,07660	0,05220	0,02600	0,0054																																	
60	0,15960	0,10600	0,08070	0,05250	0,02600	0,0053																																	
64	0,14210	0,10180	0,07660	0,05220	0,02600	0,0053																																	
68	0,12840	0,09190	0,06600	0,04290	0,02600	0,0053																																	
72	0,13640	0,09630	0,06300	0,04200	0,02600	0,0053																																	
76	0,12410	0,09160	0,06300	0,04200	0,02600	0,0053																																	
80	0,14450	0,10160	0,07660	0,05220	0,02600	0,0053																																	

Природопользование

Диаметр на высоте 1,3 м, см Diameter at height 1.3 m, cm	Объём мелкой деловой древесины, м ³ , при высоте, м Volume of small wood commodity m ³ , at height, m																																							
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40							
8																																								
10																																								
12																																								
14																																								
16																																								
18																																								
20																																								
24																																								
28																																								
32																																								
36																																								
40																																								
44																																								
48																																								
52																																								
56																																								
60																																								
64																																								
68																																								
72																																								
76																																								
80																																								

Обсуждение

Сопоставление новых нормативов с применяемыми в практике ведения лесного хозяйства. Полученные с применением уравнения образующей стволов значения объёмов деловой древесины различной крупности, дров и отходов были сопоставлены с объёмами, приведенными в сортиментной таблице [16] для деревьев сосны (рис. 2). При объёме крупной деловой древесины от 2 м³ для разрядов высот 1б, 1а, 1, 2 и 3 рассчитанные по модели образующей значения превышают найденные по сортиментным таблицам на величину до 1 м³. При объёме средней деловой древесины (рис. 2б) до 0,3 м³ табличные и предсказанные значения выхода имеют наименьшие различия, которые в дальнейшем возрастают. Для разрядов высот 1а, 1б и 1 отмечается занижение рассчитанных значений выхода средней деловой древесины по сравнению с табличными. Выход мелкой деловой древесины (рис. 2в) характеризуется наличием максимальных несоответствий между значениями признака. Объёмы, рассчитанные по модели, для высших разрядов высот оказываются значительно меньше табличных после 0,1 м³. Выход дров и отходов (рис. 2г), рассчитанный с применением модели, в большинстве случаев хорошо соответствует табличным данным. Небольшие различия начинают проявляться для высших разрядов высот после 0,6 м³.

Для получения сведений о величине варьирования между значениями объёмов выхода деловой древесины, дров и отходов, установленных посредством применения уравнения образующей и сортиментных таблиц, был произведен расчёт метрик соответствия по разрядам высот (табл. 5). Для всех лесоматериалов рассчитанные с применением уравнения образующей древесного ствола и взятые из таблиц объёмы имеют существенные различия. Значения выхода крупной деловой древесины характеризуются высокой долей объяснённой дисперсии для всех разрядов высот. Величина *RMSE* располагается в диапазоне от 0,566 до 0,137 и снижается к меньшему разряду высот. Значения *MBE* для крупной деловой древесины указывают на завышение предсказанных значений по сравнению с табличными для всех разрядов высот кроме 5а. Величина различий для высших разрядов высот составляет до 29,6%.

Выход средней деловой древесины характеризуется значениями коэффициента детерминации, расположенными в пределе от 0,606 до 0,892. Значения *RMSE* не превышают 0,094. В целом предсказанные значения оказались ниже табличных на величину до 28,3 %. Рассчитанные значения выхода мелкой деловой древесины оказались ниже табличных на величину до 57,8%, при *RMSE* не превышающей 0,056. Полученные значения выхода дров и отходов разрядов высот 1б, 1а, 1, 2, 3 превышают данные таблиц на 16,1-22,9%. Для разрядов высот 4, 5 и 5а отмечено занижение предсказанных объёмов, значения которых близки к нулевой отметке и имеют не высокого хозяйственного значения.

Для деревьев сосны Костромской области применение оцененного по региональным данным уравнения образующей древесного ствола позволяет повысить точность учёта крупной деловой древесины 1б, 1а, 1, 2, 3 разрядов высот на величину до 30% по сравнению с действующими нормативами. Это будет способствовать увеличению поступлений средств в бюджеты разного уровня при использовании лесов для заготовки древесины. Обеспечиваемая точность и скорректированный подход к определению выхода деловой древесины, дров и отходов будут способствовать рационализации использования стволов и получению более ценных сортиментов.

Ограничения исследования. Модель образующей, используемая в работе, имеет несколько основных ограничений, среди которых можно выделить следующие: 1) она может применяться только в тех почвенно-климатических условиях, которые были охвачены фактическими данными, использовавшимися для оценки эмпирических коэффициентов уравнения образующей; 2) в переувлажнённых местообитаниях Костромской области, а также в подзоне южной тайги европейской части России за пределами региона к прогнозируемым объёмам стволов, категорий крупности деловой древесины, дров и отходов необходимо подходить с осторожностью; 3) на сбег, форму, полндревесность древесных стволов, и как следствие, на сортиментную струк-

туру, оказывает большое количество факторов (возраст, класс бонитета, тип леса, полнота и др.), которые непосредственно не учитываются в модели.

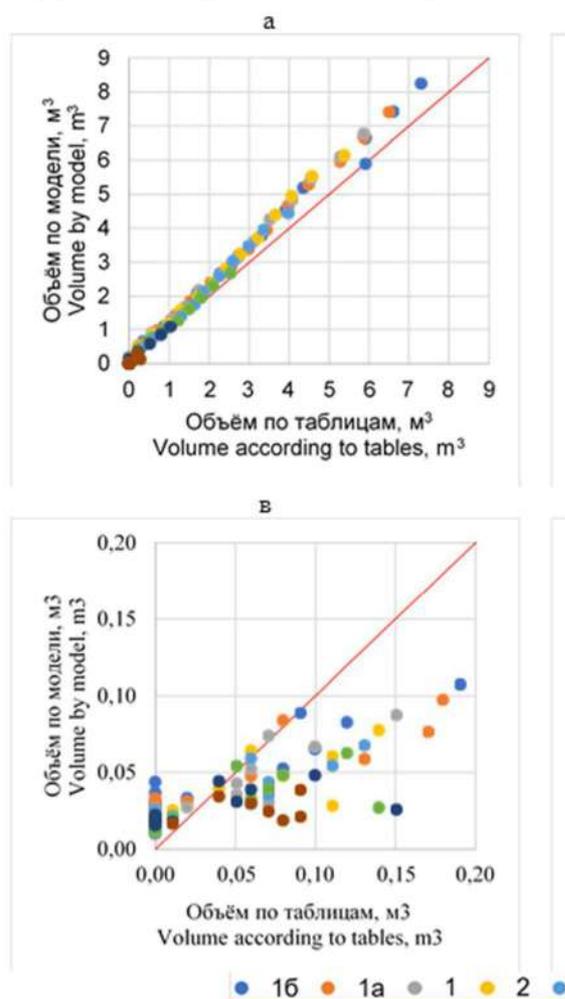


Рисунок 2. Сопоставление значений объёмов выхода деловой древесины различных категорий крупности, дров и отходов из сортиментных таблиц и установленных с применением уравнения образующей стволов: а) крупная, б) средняя, в) мелкая, г) дрова и отходы

Figure 2. Comparison of the values of the output volumes of commodity wood of different size categories, firewood and waste from assortment tables and established using the equation of the stem taper: а) large wood commodity, б) medium wood commodity, в) small wood commodity, г) firewood and waste

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Природопользование

Таблица 5

Значения метрик соответствия рассчитанных и табличных значений выхода деловой древесины, дров и отходов

Table 5

Values of the metrics of compliance of calculated and tabulated values of timber yield of various commodity categories

Крупная деловая древесина Large wood commodity					
Разряд высот Height quality class	<i>RMSE</i>	<i>MBE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	<i>R</i> ²
1б	0,566	-0,497	0,500	20,444	0,992
1а	0,550	-0,498	0,498	20,204	0,999
1	0,594	-0,545	0,545	29,591	0,998
2	0,554	-0,492	0,492	27,363	0,996
3	0,351	-0,310	0,310	20,550	0,996
4	0,153	-0,144	0,144	19,277	0,996
5	0,071	-0,067	0,067	15,152	0,994
5а	0,137	0,018	0,136	60,119	1,000
Средняя деловая древесина Medium wood commodity					
1б	0,086	0,044	0,071	18,610	0,803
1а	0,086	0,037	0,077	28,159	0,725
1	0,091	0,066	0,082	28,319	0,776
2	0,094	0,056	0,078	30,695	0,606
3	0,072	0,032	0,062	28,208	0,623
4	0,070	0,034	0,048	18,141	0,647
5	0,047	0,022	0,032	14,479	0,666
5а	0,037	0,010	0,025	13,173	0,892
Мелкая деловая древесина Small wood commodity					
1б	0,042	0,028	0,033	35,294	0,820
1а	0,056	0,039	0,044	40,255	0,633
1	0,030	0,019	0,022	28,693	0,694
2	0,043	0,029	0,034	51,052	0,376
3	0,038	0,028	0,032	50,338	0,664
4	0,052	0,035	0,039	51,907	0,106
5	0,056	0,034	0,038	49,745	0,024
5а	0,045	0,037	0,038	57,835	0,066
Дрова и отходы Firewood and waste					
1б	0,058	-0,017	0,041	17,201	0,994
1а	0,049	-0,018	0,033	16,100	0,996
1	0,051	-0,022	0,035	17,929	0,994
2	0,056	-0,024	0,037	20,117	0,996
3	0,034	-0,004	0,026	22,916	0,992
4	0,014	0,013	0,013	22,050	0,998
5	0,022	0,001	0,018	103,799	0,928
5а	0,014	0,012	0,012	43,115	0,930

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Направления дальнейших исследований.

Требуются дальнейшие исследования, направленные на оценку экономического эффекта от внедрения предложенной модели и нормативов в практику ведения лесного хозяйства Костромской области. В условиях цифровой трансформации лесного сектора экономики модель может быть включена в состав специализированных программ, предназначенных для таксации лесосечного фонда. Рассмотренная методика моделирования сортиментной структуры стволов деревьев сосны с применением уравнения образующей может быть воспроизведена для других пород и лесорастительных условий.

Заключение

Приведен обзор нормативов, применяющихся в Костромской области для определения вы-

хода деловой древесины различных категорий крупности, дров и отходов за период с 1908 года по настоящее время. Для древостоев сосны, произрастающих в Костромской области предложен алгоритм определения сортиментной структуры с применением уравнения образующей древесного ствола. Значения метрик качества указывают на преимущество предлагаемого способа сортиментации перед применением классических таблиц. Использование для сортиментации уравнения образующей древесного ствола позволит увеличить доходность ведения лесного хозяйства в Костромской области за счёт получения ранее неучитываемых средств от реализации до 30% крупной деловой древесины, относящейся к высшим разрядам высот. Применение предложенной методики будет способствовать упрощению процедуры сортиментации лесных ресурсов и сокращению расходов на её проведение.

Список литературы

1. Дубенок Н. Н., Лебедев, А. В., Чистяков С. А. Динамика основных показателей земель лесного фонда Костромской обл. и биосферного резервата «Кологривский лес». Лесохозяйственная информация. 2023; 3: 26-36. -DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.02>.
2. Истомина Э.Г. Корабельные леса Европейской России как ресурс регионального развития в XVIII-XIX вв. ВЕСТНИК РГГУ. Серия «Литературоведение. Языкознание. Культурология». 2016. 10: 106-119.
3. Материалы для оценки земель Костромской губернии. Определение доходности земельных угодий. Выпуск 1-й. Запас и прирост лесных насаждений Костромской губернии. – Кострома: Тип. Т.П. Андрониковой, 1908; 33 с.
4. Крюденер А.А. Массовые таблицы и таблицы сбега для суходольной сосны в удельных (и других) лесах южной половины Европейской России с краткими объяснениями к ним и с приложением общих вспомогательных и переводных таблиц и подробных таблиц бревен сосны. - Изд. Гл. Упр. Уделов. 5, 8. - СПб.: Тип. Гл. Упр. Уделов, 1910. Вып. 3, ч. 2-3. 1910; 35 с.
5. Крюденер А.А. Массовые таблицы и таблицы сбега для сосны по мокрым почвам и по болоту в удельных (и других) лесах Европейской России. - Изд. Гл. Упр. Уделов. 8. - СПб.: Тип. Гл. Упр. Уделов, 1910. Вып. 3, ч. 2. 1910. 35 с.
6. Крюдинер А.А. Массовые таблицы и таблицы сбега для сосны в удельных (и других) лесах северной половины Европейской России с краткими объяснениями к ним и с приложением общих вспомогательных и переводных таблиц и подробных таблиц бревен сосны. - Изд. Гл. Упр. Уделов. 9. СПб.: Тип. Гл. Упр. Уделов, 1911. Вып. 3, ч. 2. 1911; 280 с.
7. Таблицы сортиментов древесины для казенных лесных дач Костромской губернии. Кострома, 1914.
8. Лесное хозяйство: журнал лесной политики, экономики, научного лесоводства и техники. Москва: Новая деревня, 1928. 6. – 113 с.

Природопользование

9. Таблицы сортиментов древесины для лесных дач Костромской губернии Сост. в 1925 г. Утв. Расшир. техн. совещ. при Костром. гублесотд. 9 июля 1925 г. Кострома: 1925; 24 с.
10. Орлов М.М. Лесная вспомогательная книжка, 1925.
11. Таблицы исчисления объема бревен по таблицам Крюденера-Турского с распределением на сортименты, установленные по Костромской губернии. – Кострома: Костром. гублесотд., 1929; 12 с.
12. Белов А. М. Костромская губерния и ее руководители (1778-1929 годы) / А. М. Белов // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2011; Т. 17. № 5-6: 185-189.
13. Краткий справочник лесоустроителя / Сост. Ю. Н. Полянский; ВНИТОЛес. Горьк. обл. отд-ние "Обл-НИТОЛес". - Горький: 11-я тип. Росполиграфиздата, 1950; 100 с.
14. Сортиментные таблицы: для сосны, ели, дуба, березы и осины/Соавт.: М. Грошевой и др. – М. – Л.: Сельколхозгиз, 1931; 474с.
15. Сортиментные и товарные таблицы. Изд. 7-е, переработанное и дополненное. Справочник. – М., Лесная промышленность, 1981; 534 с.
16. Сортиментные и товарные таблицы для лесов центральных и южных районов Европейской части РСФСР. - Москва, 1987.
17. Кузьмичев В. В., Неповинных А.Г. Обобщенная зависимость высот от диаметров в сосновых древостоях. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2008; 41: 286-292.
18. Salazar-Ruiz A.G., Murillo-Cruz R., Salas-Rodríguez A., Fonseca-González W. Commercial volume table of *Cedrela odorata* L. in an agroforestry system with coffee in Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 2021; 18(42): 74-78. DOI: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5545>.
19. Lima R. et al. Accurate Estimation of Commercial Volume in Tropical Forests. *Forest Science*. 2020; XX (XX): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa032>.
20. Hlavica R., Adamec Z. Development of Douglas fir merchantable stem volume model in the conditions of the Czech Republic. *J. For. Sci.* 2023; 69: 515-524. DOI: <https://doi.org/10.17221/92/2023-JFS>.
21. Sharma M. Total and Merchantable Volume Equations for 25 Commercial Tree Species Grown in Canada and the Northeastern United States. *Forests*. 2021; 12: 1270. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091270>.
22. Усов С. В., Шевелев С. Л., Кулакова Н. Н., Зайцева А. С. Объемы стволов осины в зоне островных лесостепей Средней Сибири. Хвойные бореальной зоны. 2024; Т. 42; 4: 55-61.- DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-4-55-61>.
23. Шевелев С. Л., Кулакова Н.Н., Ефремова М.Н. Таксация объемов стволов и запасов древостоев ельников Енисейского края. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023; 63: 108-111. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53713021>.
24. Калачев В. А., Вайс А.А. Сбежистость нижней части стволов лиственницы в условиях заповедника «Путоранский». Хвойные бореальной зоны. 2024; Т. 42; 3:27-31-. DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-3-27-31>.
25. Демаков Ю. П. Ствол дерева как деформированный конус. Эко-потенциал. 2014; 2(6): 72-81.
26. Шевелев С. Л., Ефремова М.Н. Особенности объемообразующих показателей в древостоях Красноярско-Ачинско-Канской лесостепи. Хвойные бореальной зоны. 2018; Т. 36; 1: 97-101.
27. Забавская Л.Н., Вайс А.А. Параметры образующей функции "Harris" и форма нижней части деревьев сосны. Хвойные бореальной зоны. 2021; Т. 39; 2: 95-101. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46216526>.
28. Дубенок Н. Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области. Лесотехнический журнал. 2023; Т. 13; 4.1(52): 5-22. -DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.

29. Дубенок Н. Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Образующая, форма и объем стволов деревьев ели Костромской области. Хвойные бореальной зоны. 2024; Т. 42; 4: 23-32. -DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-4-23-32>.
30. Sharma M. Total and merchantable volume equations for 25 commercial tree species grown in Canada and the northeastern united states. *Forests*. 2021; 12: 1270. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091270>.
31. Sharma M. Increasing volumetric prediction accuracy – an essential prerequisite for end-product forecasting in Red Pine. *Forests*. 2020; 11 (10):1050. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11101050>.
32. Wang S, Wang Z., Feng Z., Yu Z., Li J. Construction of compatible volume model for Populus in Beijing, China. *Forests*. 2024; 15: 1059. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061059>.
33. Xu Y.; Jiang L., Shahzad M.K. Newly Built Model of an Additive Stem Taper System with Total Disaggregation Model Structure for Dahurian Larch in Northeast China. *Forests*. 2021; 12: 1302. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101302>.
34. Гудков А. Ю., Часимов П. Ш., Кабутов Ш. Н. Моделирование формы ствола. Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023; 247-250. -DOI: https://doi.org/10.58168/R-STD TIC2023_247-250.
35. Wilms F., Berendt F., Bronisz K. et al. Applying taper function models for black locust plantations in Greek post-mining areas. *Sci Rep*. 2024; 14:13557. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63048-1>.
36. McTague J. P., Weiskittel A. Evolution, history, and use of stem taper equations: A review of their development, application, and implementation. *Can. J. For. Res*. 2021; 51:210-235. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0326>.
37. Bronisz K., Zasada M. (2020). Taper models for black locust in west Poland. *Silva Fennica*. 2020; V. 54; 5: 10351. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10351>
38. Garcia O. Dynamic modelling of tree form. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*. 2015; 7: 39-15.
39. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. Regressionnyye modeli smeshannyh effektov zavisimosti vyso-ty ot diametra stvola v osnovnyh drevostoyah evropejskoj chasti Rossii. [Mixed-effect regression models of height versus trunk diameter dependence in pine stands in european part of Russia]. *Лесной вестник = Forestry Bulletin*. 2023; Т. 27.; 5: 37–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-37-47>.
40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614620 Российская Федерация. «Моделирование образующей древесного ствола по данным обмеров модельных деревьев»: № 2024613416 : заявл. 20.02.2024; опублик. 28.02.2024 / А. В. Лебедев, В. В. Гостев, Н. Н. Дубенок; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».
41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614587 Российская Федерация. «Обработка данных обмеров стволов модельных деревьев»: № 2024613417 : заявл. 20.02.2024; опублик. 27.02.2024 / А. В. Лебедев, В. В. Гостев, Н. Н. Дубенок; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

References

1. Dubenok N. N., Lebedev A. V., Chistyakov S. A. Dinamika osnovnyh pokazatelej zemel' lesnogo fonda Kostromskoj obl. i biosfernogo rezervata «Kologrivskij les» [Dynamics of the main indicators of forest lands in the Kostroma region and the Kologrivsky Forest biosphere reserve]. *Lesohozyajstvennaya informaciya = Forestry Information*. 2023; 3: 26-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2023.3.02>.

Природопользование

2. Istomina E. G. Korabel'nye lesa Evropejskoj Rossii kak resurs regional'nogo razvitiya v XVIII–XIX vv. [Ship-building forests of European Russia as a resource for regional development in the 18th–19th centuries]. *Vestnik RGGU. Seriya «Literaturovedenie. Yazykoznanie. Kul'turologiya» = RGGU Bulletin. Series “Literary Studies. Linguistics. Cultural Studies”*. 2016; 10: 106-119. (in Russ.)
3. Materialy dlya ocenki zemel' Kostromskoj gubernii. Opredelenie dohodnosti zemel'nyh ugodij. Vypusk 1-j. Zapas i prirost lesnyh nasazhdenij Kostromskoj gubernii [Materials for land assessment in the Kostroma province. Determination of land profitability. Issue 1. Stock and increment of forest plantations in the Kostroma province]. Kostroma: Tip. T.P. Andronikovej, 1908; 33 p. (in Russ.)
4. Kryudener A. A. Massovye tablicy i tablicy sbega dlja suhodol'noj sosny v udel'nyh (i drugih) lesah yuzhnoj poloviny Evropejskoj Rossii s kratkimi ob'yasneniyami k nim i s prilozheniem obshchih vspomogatel'nyh i perevodnyh tablic i podrobnyh tablic brevion sosny [Volume and taper tables for upland pine in appanage (and other) forests of the southern half of European Russia]. St. Petersburg: Tip. Gl. Upr. Udelov, 1910. Iss. 3, Pt. 2-3; 35 p. (in Russ.)
5. Kryudener A. A. Massovye tablicy i tablicy sbega dlja sosny po mokrym pochvam i po bolotu v udel'nyh (i drugih) lesah Evropejskoj Rossii [Volume and taper tables for pine on wet soils and marshes in appanage (and other) forests of European Russia]. St. Petersburg: Tip. Gl. Upr. Udelov, 1910. Iss. 3, Pt. 2; 35 p. (in Russ.)
6. Kryudener A. A. Massovye tablicy i tablicy sbega dlja sosny v udel'nyh (i drugih) lesah severnoj poloviny Evropejskoj Rossii s kratkimi ob'yasneniyami k nim i s prilozheniem obshchih vspomogatel'nyh i perevodnyh tablic i podrobnyh tablic brevion sosny [Volume and taper tables for pine in appanage (and other) forests of the northern half of European Russia]. St. Petersburg: Tip. Gl. Upr. Udelov, 1911. Iss. 3, Pt. 2; 280 p. (in Russ.)
7. Tablicy sortimentov drevesiny dlja kazennyh lesnyh dach Kostromskoj gubernii [Timber assortment tables for state forest estates in the Kostroma province]. Kostroma, 1914. (in Russ.)
8. Lesnoe hozyajstvo: zhurnal lesnoj politiki, ekonomiki, nauchnogo lesovodstva i tehniki [Forestry: Journal of Forest Policy, Economics, Silviculture, and Technology]. Moscow: Novaya derevnya, 1928; 6–113 p. (in Russ.)
9. Tablicy sortimentov drevesiny dlja lesnyh dach Kostromskoj gubernii [Timber assortment tables for forest estates in the Kostroma province]. Kostroma: Kostrom. gublesotdel, 1925; 24 p. (in Russ.)
10. Orlov M. M. Lesnaya vspomogatel'naya knizhka [Forestry reference book]. 1925. (in Russ.)
11. Tablicy ischisleniya ob'ema brevion po tablicam Kryudenera-Turskogo s raspredeleniem na sortimenty, ustanovlennye po Kostromskoj gubernii [Tables for calculating log volume using Kryudener-Tursky tables with assortment classification for the Kostroma province]. Kostroma: Kostrom. gublesotdel, 1929; 12 p. (in Russ.)
12. Belov A. M. Kostromskaya guberniya i ee rukovoditeli (1778–1929 gody) [The Kostroma province and its leaders (1778–1929)]. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova = Bulletin of Nekrasov Kostroma State University*. 2011; 17(5-6): 185-189. (in Russ.)
13. Kratkij spravochnik lesoustroitel'nyh [Brief handbook for forest inventory]. Comp. Yu. N. Polyansky. Gorky: 11-ya tip. Rospoligrafizdata, 1950; 100 p. (in Russ.)
14. Sortimentnye tablicy: Dlja sosny, eli, duba, berezy i osiny [Assortment tables for pine, spruce, oak, birch, and aspen]. Moscow-Leningrad: Sel'kolkhozgiz, 1931; 474 p. (in Russ.)
15. Sortimentnye i tovarnye tablicy [Assortment and commodity tables]. 7th ed. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1981; 534 p. (in Russ.)
16. Sortimentnye i tovarnye tablicy dlja lesov central'nyh i yuzhnyh rajonov Evropejskoj chasti RSFSR [Assortment and commodity tables for forests in the central and southern regions of the European part of the RSFSR]. Moscow, 1987. (in Russ.)
17. Kuzmichev V. V., Nepovinnyh A. G. Obobshchennaya zavisimost' vysot ot diametrov v sosnovykh drevostoyah [Generalized height-diameter relationship in pine stands]. *Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2008; 41: 286-292. (in Russ.)

18. Salazar-Ruiz A.G., Murillo-Cruz R., Salas-Rodríguez A., Fonseca-González W. Commercial volume table of *Cedrela odorata* L. in an agroforestry system with coffee in Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 2021; 18(42): 74-78. DOI: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5545>.
19. Lima R. et al. Accurate Estimation of Commercial Volume in Tropical Forests. *Forest Science*. 2020; XX (XX): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa032>.
20. Hlavica R., Adamec Z. Development of Douglas fir merchantable stem volume model in the conditions of the Czech Republic. *J. For. Sci.* 2023; 69: 515-524. DOI: <https://doi.org/10.17221/92/2023-JFS>.
21. Sharma M. Total and Merchantable Volume Equations for 25 Commercial Tree Species Grown in Canada and the Northeastern United States. *Forests*. 2021; 12: 1270. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091270>.
22. Usov S. V., Shevelev S. L., Kulakova N. N., Zajceva A. S. Ob'emy stvolov osiny v zone ostrovnnyh lesostepej Srednej Sibiri [Volumes of aspen trunks in the insular forest-steppe zone of Central Siberia]. *Hvojnyye boreal'noj zony = Conifers of the Boreal Zone*. 2024; 42(4): 55-61. DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-4-55-61>.
23. Shevelev S. L., Kulakova N. N., Efremova M. N. Taksaciya ob'emov stvolov i zapasov drevostoev el'nikov Enisejskogo kryazha [Inventory of trunk volumes and stocks in spruce stands of the Yenisei Ridge]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Current Issues of the Forestry Sector*. 2023; 63: 108-111. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53713021>. (in Russ.)
24. Kalachev V. A., Vajs A. A. Sbezhistost' nizhnej chasti stvolov listvennicy v usloviyah zapovednika «Putoranskij» [Taper of the lower part of larch trunks in the Putoransky Nature Reserve]. *Hvojnyye boreal'noj zony = Conifers of the Boreal Zone*. 2024; 42(3): 27-31. DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-3-27-31>. (in Russ.)
25. Demakov Yu. P. Stvol dereva kak deformirovannyj konus [Tree trunk as a deformed cone]. *Eko-potencial*. 2014; 2(6): 72-81. (in Russ.)
26. Shevelev S. L., Efremova M. N. Osobennosti ob'emoobrazuyushchih pokazatelej v drevostoyah Krasnoyarsko-Achinsko-Kanskoj lesostepi [Features of volume-forming indicators in stands of the Krasnoyarsk-Achinsk-Kansk forest-steppe]. *Hvojnyye boreal'noj zony = Conifers of the Boreal Zone*. 2018; 36(1): 97-101. (in Russ.)
27. Zabavskaya L. N., Vajs A. A. Parametry obrazuyushchej funkicii "Harris" i forma nizhnej chasti derev'ev sosny [Parameters of the "Harris" taper function and the shape of the lower part of pine trees]. *Hvojnyye boreal'noj zony = Conifers of the Boreal Zone*. 2021; 39(2): 95-101. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46216526>. (in Russ.)
28. Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gostev V. V. Model' obrazuyushchej drevesnogo stvola sosny obyknovennoj (*Pinus sylvestris* L.), proizrastayushchej v Kostromskoj oblasti [Stem taper model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Kostroma region]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2023; 13(4.1): 5-22. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>. (in Russ.)
29. Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gostev V. V. Obrazuyushchaya, forma i ob'em stvolov derev'ev eli Kostromskoj oblasti [Stem taper, shape, and volume of spruce trunks in the Kostroma region]. *Hvojnyye boreal'noj zony = Conifers of the Boreal Zone*. 2024; 42(4): 23-32. DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-4-23-32>. (in Russ.)
30. Sharma M. Total and merchantable volume equations for 25 commercial tree species grown in Canada and the northeastern united states. *Forests*. 2021; 12: 1270. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091270>.
31. Sharma M. Increasing volumetric prediction accuracy – an essential prerequisite for end-product forecasting in Red Pine. *Forests*. 2020; 11 (10):1050. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11101050>.
32. Wang S, Wang Z., Feng Z., Yu Z., Li J. Construction of compatible volume model for *Populus* in Beijing, China. *Forests*. 2024; 15: 1059. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061059>.
33. Xu Y.; Jiang L., Shahzad M.K. Newly Built Model of an Additive Stem Taper System with Total Disaggregation Model Structure for Dahurian Larch in Northeast China. *Forests*. 2021; 12: 1302. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12101302>.
34. Gudkov A. Yu., Chasimov P. Sh., Kabutov Sh. N. Modelirovanie formy stvola [Modeling trunk shape]. *Perspektivnyye resursosberegayushchie tekhnologii razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: Materialy Mezhdunarodnoj*

nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh i studentov, Voronezh, 29 sentyabrya 2023 goda [Advanced resource-saving technologies for the development of the timber industry: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Voronezh, September 29, 2023]. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2023: 247-250. DOI: https://doi.org/10.58168/R-STDTIC2023_247-250. (in Russ.)

35. Wilms F., Berendt F., Bronisz K. et al. Applying taper function models for black locust plantations in Greek post-mining areas. *Sci Rep.* 2024; 14:13557. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63048-1>.

36. McTague J. P., Weiskittel A. Evolution, history, and use of stem taper equations: A review of their development, application, and implementation. *Can. J. For. Res.* 2021; 51:210-235. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0326>.

37. Bronisz K., Zasada M. Taper models for black locust in west Poland. *Silva Fennica.* 2020; 54(5): 10351. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10351>.

38. Garcia O. Dynamic modelling of tree form. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences.* 2015; 7(1): 39-15.

39. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. Regressionnyye modeli smeshannyh effektov zavisimosti vysoty ot diametra stvola v sosnovykh drevostoyah evropejskoj chasti Rossii. [Mixed-effect regression models of height versus trunk diameter dependence in pine stands in european part of Russia]. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin.* 2023; 27(5): 37–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-37-47>.

40. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2024614620 Rossijskaya Federaciya. «Modelirovanie obrazuyushchej drevesnogo stvola po dannym obmerov model'nyh derev'ev»: № 2024613416 : zayavl. 20.02.2024: opubl. 28.02.2024 / A. V. Lebedev, V. V. Gostev, N. N. Dubenok ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet - MSHA imeni K.A. Timiryazeva». [Certificate of State Registration of Software № 2024614620, Russian Federation. "Modeling stem taper based on measurements of sample trees": № 2024613416: appl. 20.02.2024: publ. 28.02.2024 / A. V. Lebedev, V. V. Gostev, N. N. Dubenok; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy".](in Russ.)

41. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2024614587 Rossijskaya Federaciya. «Obrabotka dannyh obmerov stvolov model'nyh derev'ev»: № 2024613417 : za-yavl. 20.02.2024 : opubl. 27.02.2024 / A. V. Lebedev, V. V. Gostev, N. N. Dubenok; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet - MSHA imeni K.A. Timiryazeva». [Certificate of State Registration of Software № 2024614587, Russian Federation. "Processing of stem measurement data from sample trees": № 2024613417: appl. 20.02.2024: publ. 27.02.2024 / A. V. Lebedev, V. V. Gostev, N. N. Dubenok; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy"]. (in Russ.)

Сведения об авторах

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

✉ *Лебедев Александр Вячеславович* – доктор сельскохозяйственных 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: <http://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru.

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

Природопользование

Гостева Дарья Юрьевна – ассистент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>, e-mail: d.gosteva@rgau-msha.ru.

Information about the authors

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

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

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

Daria Yu. Gosteva – Assistant of the department of Land Management and Forestry at the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str. 49, Moscow, Russian Federation, 127434, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1853-4762>, e-mail: d.gosteva@rgau-msha.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/15>

УДК 630* 631.67:338.43

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АГРОЛЕСОВОДСТВА

Светлана С. Морковина ✉, tc-sveta@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3776-5181>

Павел С. Моисеев, post@tsutmb.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2955-0324>

Андрей Е. Писарев, jeyandrey@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0002-0761-5940>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф.Морозова, ул. Тимирязева, д.8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

Аннотация

Сельское хозяйство занимает значительную часть суши Земли и является одним из основных источников антропогенных выбросов парниковых газов. В условиях роста аридности и опустынивания регионов России, а также сокращения площади лесов, поиск сбалансированных решений для устойчивого землепользования является актуальной задачей.

Цель. Целью исследования является анализ экономических аспектов внедрения агролесоводства в России, оценка его потенциала для снижения выбросов парниковых газов и повышения устойчивости агросферы.

Методы. В работе использованы методы сравнительного анализа существующих лесомелиоративных систем и агролесоводческих практик, оценка земельного фонда для внедрения климатических проектов, а также анализ факторов, ограничивающих использование защитных лесных насаждений для целей секвестрации углерода.

Результаты. Установлено, что российские системы защитных лесных насаждений в нынешнем виде не обеспечивают необходимый эффект для развития климатически-ориентированных проектов. Выделены ключевые преимущества агролесоводства: синергетический эффект сочетания лесных и сельскохозяйственных культур, дополнительный экономический доход, высокая управляемость. Определён потенциал агролесоводства в формировании земельного фонда для климатических проектов и его инвестиционная привлекательность.

Практическое применение. Результаты могут быть использованы органами управления сельским хозяйством и природопользованием для выработки мер по интеграции агролесоводства и повышения устойчивости хозяйств, а также инвесторами и разработчиками климатических проектов для выбора эффективных решений по секвестрации углерода и развитию экосистемных услуг.

Ключевые слова: агролесоводство, климатические проекты, устойчивое землепользование, секвестрация углерода, экономика природопользования.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZUR-2024-0001, № 124020100131-5).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Морковина, С. С. Экономические аспекты агролесоводства/ С. С. Морковина, П. С. Моисеев, А. Е.Писарев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 247-262. – Библиогр.: с. 259-262 (27 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/15>.

Поступила 25.02.2025. Пересмотрена 27.04.2025. Принята 26.05.2025. Опубликована онлайн 26.06.2025.

Article

Economic aspects of agroforestry

Svetlana S. Morkovina ✉, tc-sveta@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3776-5181>

Pavel S. Moiseev, post@tsutmb.ru,  <https://orcid.org/000-0003-2955-0324>

Andrey E. Pisarev, jeyandrey@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0002-0761-5940>

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

Abstract

Agriculture occupies a significant part of the Earth's land area and is one of the main sources of anthropogenic greenhouse gas emissions. In the context of increasing climate aridity and desertification of Russian regions, as well as decreasing forest area, the search for balanced solutions for sustainable land use is an urgent issue.

Aim. The aim of the research is to analyse the economic aspects of the agroforestry implementation in Russia, assessing its potential to reduce greenhouse gas emissions and improve the sustainability of the agrosphere.

Methods. The work uses methods of comparative analysis of existing forest reclamation systems and agroforestry practices, assessment of land fund for the implementation of climate projects, and analysis of factors limiting the use of protective forest plantations for carbon sequestration.

Results. It was found that the Russian systems of protective forest plantations in their current form do not provide the necessary effect for the development of climate-oriented projects. The main advantages of agroforestry: synergetic effect of combining forest and agricultural crops, additional economic income, high manageability have been identified. The potential of agroforestry in the formation of land fund for climate projects and its investment attractiveness has been determined.

Practical application. The results can be used by agricultural and nature management authorities to develop measures to integrate agroforestry and increase farm resilience, as well as by investors and climate project developers to select effective solutions for carbon sequestration and ecosystem services development.

Keywords: agroforestry, climate projects, sustainable land use, carbon sequestration, environmental economics.

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FZUR-2024-0001, № 124020100131-5)

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

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

For citation: Morkovina S. S., Moiseev P. S., Pisarev A. E. (2025). Economic aspects of agroforestry. Forest Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 247-262 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/15>.

Received 25.02.2025. Revised 27.04.2025. Accepted 26.05.2025. Published online 26.06.2025.

Введение

Современное сельское хозяйство занимает около 38% поверхности суши Земли и оказывает колоссальное влияние на глобальные экосистемы и климат, являясь одним из крупнейших антропогенных источников выбросов парниковых газов [1]. Рост населения и повышение спроса на продовольствие приводят к интенсификации землепользования, что, в свою очередь, сопровождается деградацией агроландшафтов, сокращением биологического разнообразия, разрушением почв и увеличением рисков опустынивания, особенно в аридных и засушливых регионах [2, 3]. В последние десятилетия на территории России отмечается усиление негативных тенденций, связанных с опустыниванием и повышением аридности, что затрагивает уже 28 субъектов Российской Федерации [4]. Одной из основных причин этих изменений считается сокращение площади лесов, играющих ключевую роль в поддержании водного режима, защите почв от эрозии и секвестрации углерода [5].

Исследования отечественных и зарубежных авторов неоднократно доказывают, что интеграция древесных растений в структуры сельскохозяйственных угодий способствует не только улучшению микроклимата и повышению урожайности, но и формированию устойчивых агроландшафтов, обладающих высоким потенциалом адаптации к климатическим стрессам [6-8].

В странах Европы, Азии и Африки акцентируются преимущества систем агролесоводства, обеспечивающих разнообразные экосистемные услуги, включая увеличение органического вещества в почве, регулирование водного баланса, создание среды обитания для полезных организмов и повышение экономической устойчивости сельских территорий [9-11].

В России исторически сложившиеся системы лесомелиоративных насаждений играли важную роль в стабилизации сельскохозяйственного производства, однако их площадь в последние десятилетия значительно сократилась и сегодня составляет лишь 1,3% аграрных территорий, что намного ниже научно обоснованных нормативов [12].

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 [13, 14]. Вместе с тем, в России недостаточно разработан вопрос сравнения эффективности традиционных лесных насаждений и современных агролесоводческих практик, а также оценки факторов, ограничивающих их широкое внедрение в региональных условиях.

Целью настоящего исследования является анализ экономических аспектов внедрения агролесоводства в России, выявление его потенциала для повышения эффективности использования земельных ресурсов, ограничения выбросов парниковых газов и формирования климатически-устойчивых моделей сельскохозяйственного землепользования.

Материалы и методы

Исследование основано на применении интегрированного методологического подхода, обеспечивающего всесторонний анализ экономических аспектов агролесоводства в условиях Российской Федерации.

Проведен анализ актуальных отечественных и зарубежных научных публикаций, монографий, нормативно-правовых актов, а также официальных отчетов профильных международных и национальных организаций (FAO, Рослесхоз, Росстат), посвященных вопросам агролесоводства, лесомелиорации, секвестрации углерода и устойчивого землепользования. Особое внимание уделялось работам, опубликованным в рецензируемых журналах за период 2017-2023 гг.

В качестве эмпирической базы были использованы официальные статистические данные о лесистости территории России, площади защитных лесных насаждений, структуре сельскохозяйственных и лесных угодий, динамике их изменений (по материалам Росстата, Рослесхоза, кадастровых данных, а также отчетов и баз данных FAO). Статистические данные охватывают период 2010–2022 гг.

Проведен сравнительный анализ традиционных лесомелиоративных систем и современных агролесоводческих практик по критериям экологической и экономической эффективности, синергетического потенциала, управляемости и инвестиционной привлекательности. Для оценки раскрытия дополнительных экосистемных услуг и потенциала секвестрации углерода использовался факторный анализ.

Для определения объема земель, перспективных для внедрения агролесоводческих климатических проектов, проведено картографирование аграрных территорий и анализ нормативных показателей облесения. Оценка инвестиционной привлекательности осуществлялась путём экспертного анализа с учётом современных экономических механизмов — углеродных рынков, субсидированной государственной поддержки и перспектив общественно-рыночного финансирования климатических инициатив.

Количественные и качественные показатели, полученные в ходе исследования, были обработаны с использованием пакетов прикладных статистических программ (Microsoft Excel, Statistica, ArcGIS). Для иллюстрации результатов применялись графические методы, построение картографических схем и диаграмм.

Предваряя оценку инвестиционной привлекательности внедрения агролесоводческих практик на сельскохозяйственных землях, актуальным представляется учет не только прямых экономических эффектов, но и климатических выгод, в частности — объема секвестрации углерода. В современных научных исследованиях одним из универсальных критериев сравнения климато-ориентированных проектов становится показатель углеродоемкости инвестиционных затрат, отражающий соотношение между вложенными средствами и достигнутыми результатами по фиксации углерода в биоценозах (FAO, 2022).

Для комплексного анализа данного параметра в рамках настоящей работы был использован коэффициент углеродоемкости инвестиционных затрат (Куи), характеризующий эффективность капиталовложений с точки зрения получаемого климатиче-

ского эффекта на единицу вложенных средств. Расчет соответствующего коэффициента осуществлялся по следующей формуле:

$$K_y = \frac{S_c}{C_{пв}} \quad (1)$$

где S_c – суммарный объем поглощенного углерода, приведенные к n -му году, т. С.;

$C_{пв}$ – текущие затраты на проведение мероприятий, приведенные к n -му году, р./га. [17].

Использование данного показателя позволяет объективно сравнивать различные проектные решения в сфере агролесоводства по критерию эффективности углеродной секвестрации на рубль инвестированных средств, что особенно актуально в условиях развития инструментов «зеленого» финансирования и реализации климатических инициатив на национальном и региональном уровнях.

Результаты и их обсуждение

Лесистость Черноземной полосы России за 150 лет уменьшилась с 38-40 до 6-15%, а водосборных бассейнов крупных рек с 30-40 до 10-30%. Существенно ухудшился генофонд многих древесных и кустарниковых пород.

Одним из способов поддержания климата является интеграция лесов в сельское хозяйство путём создания защитных лесных насаждений. Исследователями неоднократно доказано, что одним из главных факторов устойчивого развития сельскохозяйственного производства является формирование и эксплуатация лесо-аграрных ландшафтов, основным элементом которых - защитные лесные насаждения [12]. Защитные лесные насаждения - важные компоненты ландшафтов аридных регионов, выполняющие разнообразные охраняющие, экологические и социальные функции.

За всю историю защитного лесоразведения в России было посажено 5,2 млн. га защитных лесных насаждений, повышающих устойчивость сельского хозяйства к климатическим шокам. К настоящему времени их площадь более чем в 2 раза меньше. К этому привели ежегодная гибель лесных культур из-за нестабильности и низкого качества проведения посадочных работ и ухода за посадками, а также старение насаждений. В настоящее время площадь искусственных защитных лесных насаждений разного

назначения составляет лишь 1,3% аграрной территории России, что по крайней мере в 3–4 раза меньше научно обоснованных норм облесения [13].

Принципы создания лесных насаждений на сельскохозяйственных землях в нашей стране отличаются от европейских стран, в которых древесные породы выращиваются в сочетании с сельскохозяйственными культурами по правилам агролесоводства. Системы агролесоводства обеспечивают множественные результаты, снижают риски земледелия и увеличивают доходы землепользователей, а также способствуют реализации экосистемных услуг, в отличие от традиционного сельского хозяйства.

В наиболее общем понимании агролесоводство – это «система землепользования, которая включает сочетание лесоводства и растениеводства/животноводства в целях получения дополнительных экономических доходов».

Агролесоводство предполагает комбинирование на одной территории лесного и сельского хозяйства для повышения эффективности землепользования [14,15].

Наиболее яркими примерами агролесоводства является выращивание сельскохозяйственных культур в аллельных посадках деревьев на небольших фермах (чаще всего в развивающихся странах), где деревья обеспечивают тень, топливо или корм.

Еще один пример - сочетание выращивания деревьев и пастбищ, для организации выпаса животных, распространен в южных странах Африке и Азии [16].

Наиболее очевидным преимуществом таких систем землепользования является снижение биоклиматических рисков, повышение урожайности сельскохозяйственных культур, уменьшение дозы внесения удобрений. В последние годы исследователи рассматривают агролесоводство, как систему адаптации к изменению климата за счет более устойчивых систем лесного и сельского хозяйства.

В нашей стране опыт создания лесных насаждений для целей противодействия эрозии почв, выветривания, и защиты сельскохозяйственных культур насчитывает более чем 70-летний период. Защитные лесные насаждения, начали создаваться в южных регионах с 1948 года, в соответствии с принятым Советом Министров СССР и ЦК ВКП(б)

«Сталинским планом преобразования природы» [17]. Важность защитной функции таких насаждений подчеркнута в Федеральном Законе «О мелиорации земель», который направлен на повышение продуктивности и устойчивости земледелия, обеспечение гарантированного производства сельскохозяйственной продукции.

Исследования показывают, что агролесоводство имеет большой потенциал сокращения выбросов парниковых газов, путем поглощения углерода растениями и почвой. Установлено, что сочетание древесных и сельскохозяйственных культур имеет потенциал для накопления от 29 до 53 Мг га⁻¹ С во влажных высокогорьях Африки, от 39 до 195 Мг га⁻¹ С в Южной Америке и от 12 до 228 Мг га⁻¹ С в Юго-Восточной Азии [9,10]. Во влажных тропиках потенциал систем агролесоводства на основе деревьев для секвестрации углерода в растительности может составлять более 70 Мг С га⁻¹ и до 25 Мг га⁻¹ в верхних 20 см почвы [11].

Агролесоводство также способно компенсировать выбросы парниковых газов в сельском хозяйстве, за счет подбора древесных растений и приемов обработки почвы на выделенных участках. По данным Всемирного центра агролесоводства, агролесоводство может увеличить урожайность сельскохозяйственных культур на 50% и может секвестрировать 3,5 тонны углерода на гектар в год [21].

Проведённая нами сравнительная оценка агролесомелиоративных практик и агролесоводства позволила выделить ряд как общих, так и специфических характеристик указанной деятельности (табл. 1). В обоих случаях формирование древесно-кустарниковых насаждений на сельскохозяйственных землях сопровождается выраженным экологическим эффектом, включающим водоохранную функцию, сокращение поверхностного стока и связывание наносов и биогенных элементов [18], а также улучшение микроклиматических условий и физико-химических свойств почвы, что создает благоприятные предпосылки для роста и развития аграрных культур [19].

Обобщение материалов многочисленных исследований однозначно свидетельствует о положительном влиянии лесных полос на урожайность сельскохозяйственных культур и продуктивность

Природопользование

пастбищ. Так, по данным Н.В. Дормидонтовой, при обустройстве агролесомелиоративных насаждений отмечается повышение продуктивности травостоя на эродированных пастбищах на 28–53 % [20]. Реакция отдельных сельскохозяйственных культур на присутствие полезащитных полос варьирует; при этом для ряда культур рост урожайности на облесённых участках может достигать 15–25 % [21]. Данные эффекты обусловлены как оптимизацией водного режима почвы, так и биологической активностью древесно-кустарниковой растительности в структуре агроландшафтов [22-24].

Имеется принципиальное различие в целевых установках и ожидаемых результатах реализации агролесомелиоративных мероприятий и агролесоводческих систем. В частности, агролесомелиоративные насаждения создаются преимущественно с целью достижения водоохраных, почвозащитных и климаторегулирующих эффектов, и их экономическая отдача, как правило, не рассматривается в качестве приоритетного результата. В отличие от этого, внедрение агролесоводства изначально ориентировано на получение комплексных выгод, сочетающих

как эколого-климатические, так и прямые экономические эффекты за счет интеграции производства сельскохозяйственной и древесной продукции.

Агролесоводческие системы обеспечивают возможность долгосрочных устойчивых инвестиций с учетом диверсификации видов продукции и снижения рисков, связанных с колебаниями рыночных цен и погодных условий. Помимо этого, на участках с низкой агроплодородностью либо ограниченной пригодностью для растениеводства, агролесоводство открывает дополнительные экономические перспективы за счёт ускоренного выращивания древесины, позволяя получать компенсационные доходы там, где традиционное сельское хозяйство экономически неэффективно или сопряжено с высокими издержками [25,27].

Таким образом, фундаментальное отличие агролесоводства заключается в стратегической нацеленности на создание многофункциональных землепользовательских систем, способных обеспечивать как повышение биопродуктивности ландшафта и экосистемные услуги, так и получение дополнительного дохода для сельских товаропроизводителей.

Таблица 1

Сравнительная оценка результатов деятельности по созданию агролесомелиоративных насаждений и агролесоводства

Table 1

Comparative assessment of the results of agroforestry plantations and agroforestry activities

Признаки/Indications	Агролесомелиоративные насаждения/Agroforestry and reclamation plantations	Агролесоводство/ Agroforestry
Наличие экологического эффекта/ Existence of environmental effect	Имеется/Available	Имеется/Available
Наличие экономического эффекта за счет увеличения урожайности/Existence of economic effect due to increased yields	Имеется/Available	Имеется/Available
Наличие экономического эффекта от заготовки древесины/Existence of economic effect from timber harvesting	Отсутствует/Absent	Имеется/Available
Риск недополучения урожая сельскохозяйственных культур/Risk of shortfall in crop yields	Имеется/Available	Имеется, незначительный/ Available, insignificant

Природопользование

Единовременные затраты/One-off costs	Значительные на единицу продукции/Significant per unit of production	Менее значительные на единицу продукции/ Less significant per unit of production
Реализация климатических проектов/ Implementation of climate projects	Затруднительна/Difficult	Возможна/ Possible

В классической трактовке агролесоводство характеризуется интеграцией древесных и сельскохозяйственных компонентов в целостную биологическую систему, способствующую оптимизации экономических результатов при одновременном снижении производственных рисков. Данный тип землепользования предусматривает возможность выращивания различных видов и форм древесных растений—в зависимости от целевых ориентиров (биомасса, древесина, кормовые ресурсы и др.), а также совмещение их с культивированием сельскохозяйственных культур и разведением животных.

Ключевым отличием агролесоводческих систем является выраженный синергетический эффект, возникающий в результате совместного получения экономической и экологической отдачи — за счет интеграции древесных, сельскохозяйственных и животных компонентов на одной площади. Такие системы направлены на повышение общей биопродуктивности, достижение высоких урожаев и обеспечение разнообразия продукции, что способствует устойчивому развитию сельских территорий.

Поскольку агролесоводство, наряду с эколого-климатическими эффектами, ориентировано на получение экономических выгод, подобные системы являются управляемыми. Их функционирование предусматривает проведение целенаправленных мероприятий по поддержанию устойчивости природных ресурсов, сохранению и воспроизводству плодородия почвы, а также снижению антропогенного воздействия на окружающую среду.

Практика зарубежных стран свидетельствует о широком разнообразии агролесоводческих моделей, включая лесопастбищные системы (совмещение древесных насаждений с выпасом скота), аллейные системы (чередование рядов древесных и травянистых культур), использование лесных насаждений для получения плодов, цветов, ягод с медицинскими, декоративными и пищевыми целями, а также

культивирование деревьев на приусадебных участках для получения топлива или комбинированного производства с овощеводством [18, 19].

Деревья также могут улавливать углерод и улучшать качество почвы, поэтому агролесоводство все чаще рассматривается в единой концепции низкоуглеродного развития стран [20]. В работе ряда авторов отмечено, что 630 млн га площади могут быть использованы под агролесоводство, с потенциалом секвестрации 586 Мт С год⁻¹ к 2040 году [21].

Чтобы узнать потенциал агролесоводства как элемента системы низкоуглеродного развития региона или страны в целом, важным моментом является точная оценка площади пригодной для организации подобных эколого-экономических систем.

Известно, что общий правовой режим земель в Российской Федерации определяется исходя из их принадлежности к той или иной категории и разрешенного использования в соответствии с зонированием территорий:

- земли сельскохозяйственного назначения;
- земли населенных пунктов;
- земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, земли для обеспечения космической деятельности, земли обороны, безопасности и земли иного специального назначения;
- земли особо охраняемых территорий и объектов;
- земли лесного фонда;
- земли водного фонда;
- земли запаса.

Структура земельного фонда Российской Федерации по категориям земель представлена на рисунке 1 и отражает долю каждой категории земель в общем объеме земельных ресурсов на конец 2023 года.

На основании данных Рослесхоза и Росстата за 2023 год, лесные земли охватывают примерно 66 % территории Российской Федерации, что наглядно

Природопользование

отражается самым крупным сегментом на соответствующей диаграмме. Для сравнения, на долю сельскохозяйственных угодий приходится около 22 % площади страны, земли населённых пунктов состав-

ляют примерно 1%, а остальные 11% занимают прочие категории, включающие промышленные зоны, водные объекты, особо охраняемые природные территории и другие виды использования земель.

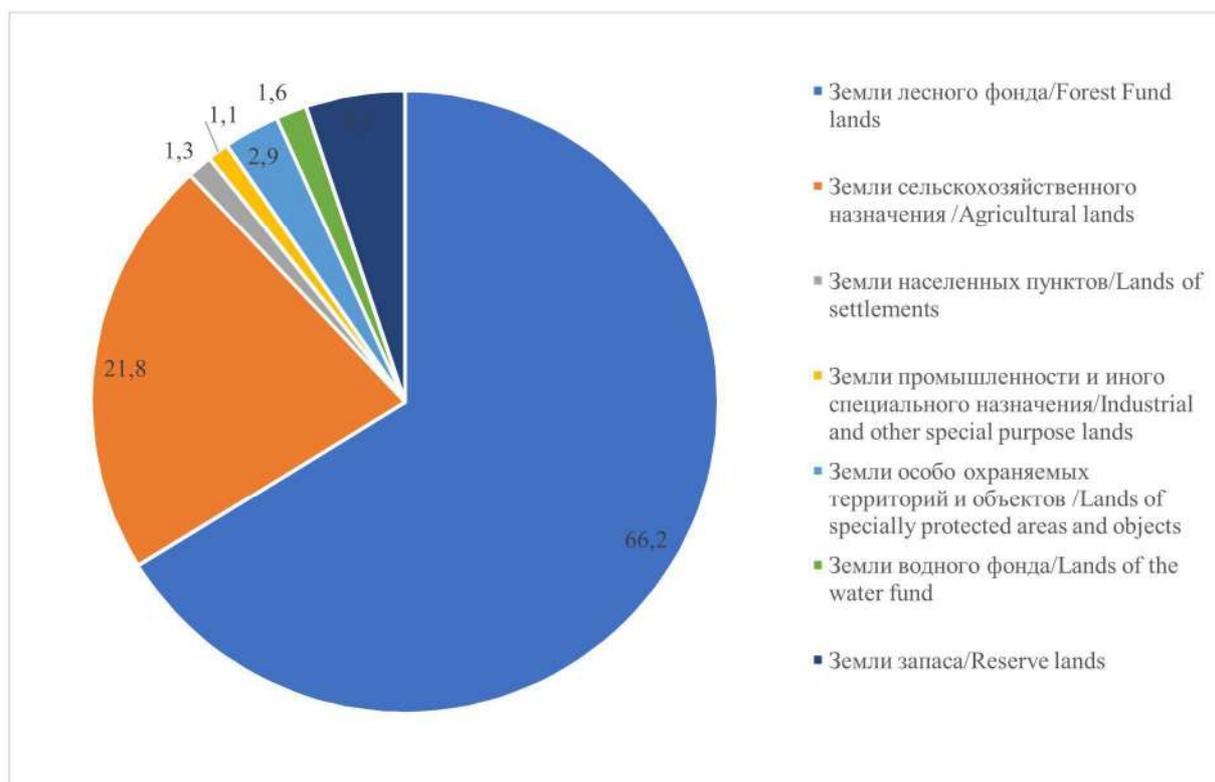


Рисунок 1. Структура земель в Российской Федерации, 2023, %

Figure 2. The structure of lands in the Russian Federation, 2023, %

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Выраженное преобладание лесных земель подчёркивает их ключевую роль в формировании региональных и глобальных экологических процессов: регулировании углеродного обмена, поддержании биоразнообразия и водного баланса, защите почв и обеспечении экосистемных услуг. Этот фактор обуславливает актуальность разработки и внедрения интеграционных систем агролесоводства именно на стыке сельскохозяйственных и лесных ландшафтов, что способствует рациональному использованию природных ресурсов и объединению природоохраненных и экономических интересов.

Преобладание указанных категорий земель свидетельствует не только о значительном аграрном и лесохозяйственном потенциале страны, но и служит важным индикатором для проведения мониторинга состояния и рационального использования земельных ресурсов. По состоянию на 1 января 2024 года площадь земель сельскохозяйственного назначения составляла 374 967,5 тыс. га. В сравнении с предыдущим годом отмечено сокращение данной категории земель на 4 167,2 тыс. га в структуре земельного фонда Российской Федерации. Вместе с тем, на землях сельскохозяйственного назначения

Природопользование

площадь лесных насаждений, обладающих ключевым значением для поддержания плодородия почв и формирования устойчивых агроландшафтов, составляет 16,2 млн га.

На первый взгляд существующие агролесомелиоративные системы могли бы быть использованы в качестве основы для реализации мер по секвестрации углерода. Однако, существует ряд причин, ограничивающих проектную деятельность в существующих насаждениях.

Во-первых, значительная часть насаждений, входящих в состав существующих агролесомелиоративных систем являются старовозрасными, и в значительной степени утратившими первоначальную конструкцию, а значит и экологический потенциал.

Во-вторых, старовозрастные насаждения требуют реконструкции и частичной, а в некоторых ситуациях полной ликвидации накопленной древесины, при этом поддержание углеродного баланса выглядит весьма проблематичным.

В-третьих, в случае лесоводственного вмешательства в существующие насаждения следует обеспечить минимальные выбросы, что достаточно сложно с технологической точки зрения.

В-четвертых, затраты на переформирование защитных насаждений в углеродные могут быть достаточно высокими, а ожидаемые эффекты несопоставимыми с ними в горизонте реализации климатических проектов.

Следует также отметить сохраняющуюся неопределённость, связанную с возможными изменениями в действующем законодательстве, а также существующие сложности, возникающие при реализации проектной деятельности на землях сельскохозяйственного назначения.

Тогда в качестве альтернативы существующим агролесомелиоративным системам следует рассматривать постагрогенные земли, имеющиеся в значительной части субъектов РФ. Постагрогенные земли зарастают древесно-кустарниковой растительностью, формируют низкопродуктивные молодняки, имея при этом огромный потенциал не только для выращивания сельскохозяйственных культур, но и создания высокопродуктивных насаждений [22].

Наибольшим потенциалом агролесоводства обладают северо-западные регионы страны, в которых уже сейчас очевидна проблема наличия неиспользуемых сельскохозяйственных земель, площадь которых по разным оценкам составляет более 40 млн. га [23]. Они переведены в залежь и трансформируются под влиянием естественных и антропогенных процессов: почвообразования, саморазвития почв, зарастания лесом, задернения, залужения. В регионах увеличение площадей, деградировавших и заросших лесом приводит к уменьшению обрабатываемых сельских территорий, а, следовательно, недополучению доходов от выращивания сельскохозяйственных культур или животноводства (рис.2).

Степень зарастания сельскохозяйственных земель древесно-кустарниковой растительностью определяется совокупностью факторов, среди которых существенное значение имеют видовое разнообразие окрестной флоры, пространственная близость к лесному массиву, преобладающее направление ветров, принадлежность к определённой лесорастительной зоне, тип сельскохозяйственного использования, площадь участка, продолжительность незанятости пашни, а также гранулометрический состав почвы.

По данным мониторинга, проведённого на сельскохозяйственных землях, установлено, что процессам зарастания древесно-кустарниковыми сообществами подвержено 8 233,966 тыс. га, что составляет 48,62 % от общей площади неиспользуемой пашни. Из этой площади длительно не используемая пашня (более 10 лет) занимает 7 744,271 тыс. га, или 45,72 % от общей площади неиспользуемых земель.

Экономическая эффективность вовлечения указанных участков в хозяйственный оборот будет напрямую зависеть от уровня их плодородия и степени зарастания. Одновременно наличие значительных площадей неиспользуемых сельскохозяйственных земель открывает перспективы для внедрения агролесоводческих технологий, с возможностью их сочетания с мероприятиями, направленными на увеличение поглощения парниковых газов древесной растительностью и почвой, то есть для реализации климатических проектов.

Природопользование

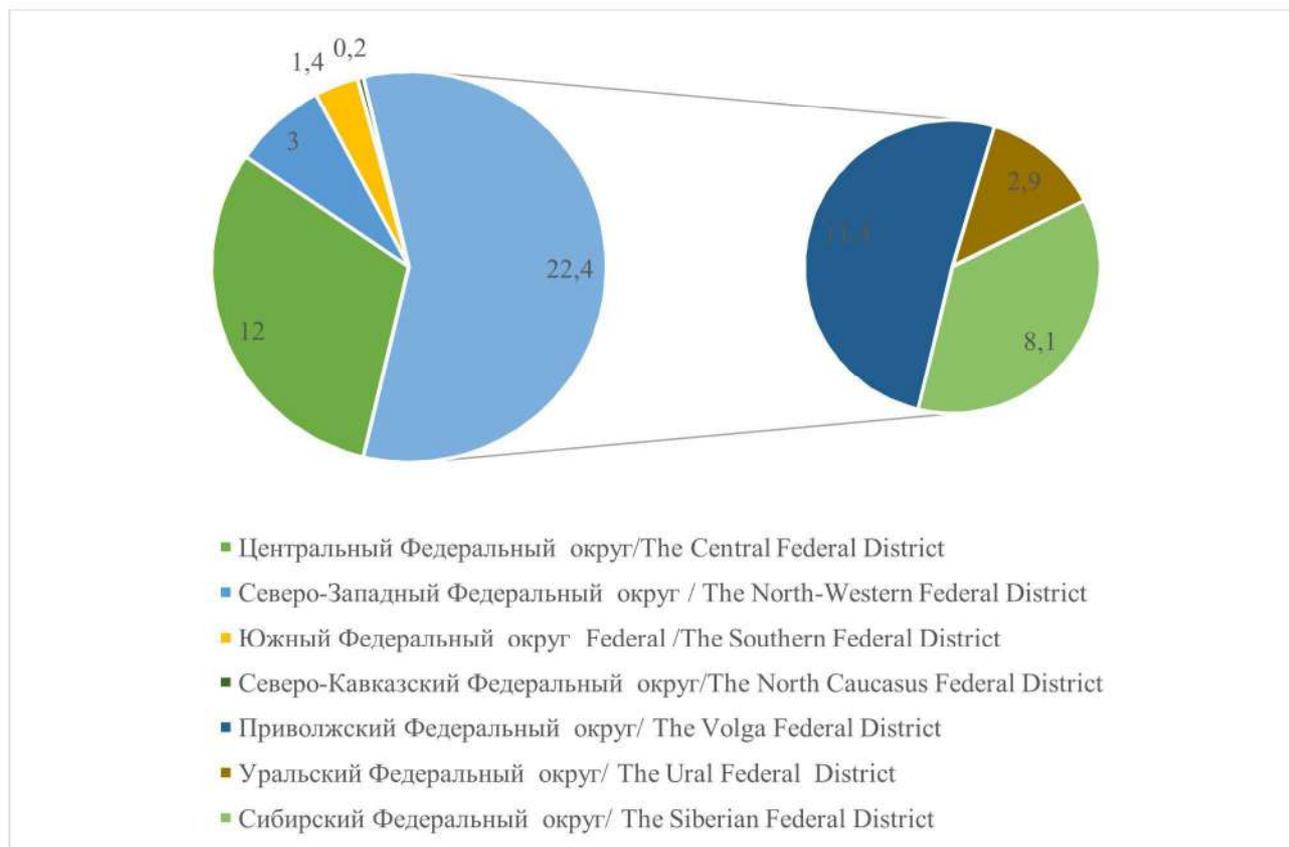


Рисунок 2. Доля неиспользуемой пашни заросшей древесно-кустарниковой растительностью в общей площади неиспользуемой пашни по федеральным округам на 01.01.2022 г., % [26]

Figure 2. The share of unused arable land overgrown with woody and shrubby vegetation in the total area of unused arable land in the federal districts as of 01.01.2022,

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

При разработке климатических проектов в формате агролесоводства требуется соблюдение комплекса требований, предъявляемых к подобной проектной деятельности: сохранение естественных травянистых экосистем (луговых, степных и т.д.), недопущение использования интродуцированных и чужеродных для местной флоры видов, а также отказ от технологий и техники с высоким углеродным следом. Базовая линия для подобных проектов может быть определена как «нулевая» или близкая к ней в части углеродного баланса.

Внедрение проектной деятельности возможно как в форме создания и реконструкции противоэрозионных и ползащитных лесных насаждений, так и посредством организации аллейных и полосных агролесоводственных систем на сельскохозяйственных землях, ранее не используемых в производственных целях.

Экономические индикаторы эффективности таких проектных решений представлены в таблице 2.

Природопользование

Таблица 2

Параметры климатических проектов по агролесоводству

Table 2

Parameters of agroforestry climate projects

Модель агролесоводства/ Agroforestry model	Ожидаемое поглощение выбросов, т CO ₂ -экв./га в год/ Expected emission uptake, t CO ₂ -eq/ha/year	Инвестиции, тыс. руб./га/ Investments, thousand rubles /ha	Сроки реализации климатического проекта/ Timeframe for the implementation of the climate project	Коэффициент углеродоёмкости инвестиционных затрат т CO ₂ -экв./ тыс. руб. на 1га/ Carbon intensity coefficient of investment costs t CO ₂ -eq./thousand rubles per 1ha/
Аллейные посадки древесных и сельскохозяйственных растений/ Alley plantings of woody and agricultural plants	6,0 -10,0	до 130/ up to 130	до 20 лет/ up to 20 years	0,92-1,53
Лесо-пастбищные системы/ Forest and pasture systems	4,2	59	до 20 лет/ up to 20 years	1,42

В качестве одного из ключевых показателей инвестиционной привлекательности климатических проектов рассчитан коэффициент углеродоемкости инвестиционных затрат. Данный коэффициент отражает отношение объема секвестрации (депонирования) парниковых газов к размеру инвестированных финансовых ресурсов, то есть показывает, какой объем сокращения или связывания парниковых газов обеспечивается на каждую единицу вложенных инвестиций.

Коэффициент углеродоемкости инвестиционных затрат может рассматриваться в качестве эффективного инструмента количественной оценки целесообразности вложения капитала в проектные мероприятия, направленные на увеличение способности экосистем к поглощению парниковых газов. К таким мероприятиям, в частности, относятся создание новых лесных и агролесомелиоративных насаждений, восстановление деградированных

почв, проведение агролесоводческих практик, а также совершенствование землепользования.

Значение данного коэффициента ($K_{уг.} > 1.0$), рассчитанное для проектов по агролесоводству, свидетельствует о высокой эффективности использования инвестиций с точки зрения углеродного эффекта. Это указывает на то, что на каждый рубль (или другую валютную единицу), вложенный в реализацию данных мероприятий, обеспечивается депонирование более одной единицы парниковых газов (в эквиваленте CO₂). Соответственно, показатели коэффициента углеродоемкости, превышающие единицу, могут служить основанием для принятия положительных инвестиционных решений потенциальными инвесторами, заинтересованными не только в экономической отдаче, но и в достижении экологических целей, связанных с сокращением углеродного следа.

Таким образом, коэффициент углеродоемкости инвестиционных затрат способствует формиро-

ванию объективного представления о целесообразности и потенциале вложений в природоохранные и климатические проекты различного профиля.

Заключение

Развитие и внедрение систем агролесоводства на неиспользуемых землях сельскохозяйственного назначения представляют собой эффективный инструмент для повышения потенциала секвестрации углерода, а также для реализации стратегий по смягчению последствий климатических изменений. Интеграция элементов лесоводства с традиционным растениеводством и животноводством способствует не только сокращению выбросов парниковых газов, но и увеличению запасов углерода, аккумулируемого как в почвенном слое, так и в биомассе древесных растений. Такие междисциплинарные подходы формируют основу для устойчивого землепользования, повышая продуктивность агроэкосистем и минимизируя негативные экологические воздействия.

Агролесоводческие системы отличаются способностью эффективно удалять углекислый газ из атмосферы, депонируя его как в надземной, так и в подземной биомассе в течение продолжительных периодов времени. Кроме того, они способствуют укреплению и поддержанию биоразнообразия, повышению плодородия почв, а также оказывают значимое положительное воздействие на социальную сферу, создавая новые рабочие места и улучшая благосостояние сельских территорий.

Экономическая привлекательность агролесоводства обусловлена рядом преимуществ, среди которых можно выделить следующие. Во-первых, реализация агролесоводческих систем позволяет оптимизировать и перераспределять единовременные затраты за счет многоцелевого использования земельных участков, что приводит к снижению затрат на производство единицы продукции. Во-вторых, интеграция лесных и аграрных практик способствует ускорению получения первых доходов от использования земли, по сравнению с классическим лесоводством, где время ожидания экономической отдачи может быть значительно большим. В-третьих, диверсификация продукции и источников дохода сни-

жает риски, связанные с монокультурным земледелием, повышая экономическую устойчивость хозяйства.

Особое значение в оценке инвестиционной привлекательности подобных природоохранных проектов имеет коэффициент углеродоемкости инвестиционных затрат. Данный показатель характеризует соотношение между объемом секвестрации парниковых газов и размером вложенных инвестиций, то есть отражает, какое количество связанного углерода приходится на единицу финансовых вложений. Расчеты для агролесоводческих проектов показывают, что значения коэффициента, превышающие единицу ($K_{уг} > 1.0$), свидетельствуют о высокой эффективности использования инвестиционных средств для достижения климатических целей. Это делает данные проекты особенно привлекательными как для частных инвесторов, так и для государственных и международных программ, ориентированных на снижение углеродного следа.

Таким образом, продвижение и масштабирование агролесоводческих систем могут оказать существенный вклад в глобальные усилия по борьбе с изменением климата. В сочетании со значительными экологическими и социально-экономическими преимуществами, агролесоводство формирует прочную основу для перехода к устойчивому и низкоуглеродному развитию. Поддержка и стимулирование подобных систем всеми заинтересованными сторонами является одним из ключевых направлений реализации национальных и международных обязательств в области климатической политики.

Природопользование

Список литературы

1. FAO. Agroforestry and tenure / Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, 2022. 168 p. Url.: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc2705en>
2. Кретинин В. М. Агроресоводство. – Волгоград: Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук, 2021. – 268 с. – ISBN 978-5-6044587-6-1.
3. Modeling of the vertical structure of shade trees in cacao agroforestry systems / B. Sánchez-Díaz, L. Ríos-Rodas, A. Sol-Sanchez [et al.] *Theoretical and Applied Ecology*. 2023; 1:28-37. – DOI 10.25750/1995-4301-2023-1-028-037.
4. Worku A. The Role of Agroforestry in Ecosystem Services and Mitigation of Climate Change. *Vegetable Crops of Russia*. 2024; 4:11-119. – DOI 10.18619/2072-9146-2024-4-111-119.
5. Santoro A., Venturi M., Bertani R., Agnoletti M. A review of the role of forests and agroforestry systems in the FAO Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) programme. *Forests*. 2020; 11(8):860.
6. Kay S., Rega C., Moreno G., Szerencsits E., den Herder M., Palma J. H. N., Herzog F. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*. 2019; 83: 581-593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
7. Smith J., Pearce, B.D., Wolfe M.S. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2022; 37(1): 5-17. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000350>
8. Cardinae R. et al. Carbon sequestration in agroforestry systems-a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2017. 37, 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0442-2>
9. Mosquera-Losada M.R., Moreno G., den Herder M. et al. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*. 2022. Vol. 119, 106524. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106524>
10. Torralba M., Fagerholm N., Burgess, P.J., Moreno, G., Plieninger T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems, Environment*. 2016; 230:150-161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
11. Wilson M.H., Lovell S.T. Agroforestry—The Next Step in Sustainable and Resilient Agriculture. *Sustainability*. 2016; 8(6), 574. <https://doi.org/10.3390/SU8060574>
12. Жданов Ю.М., Хорошавин В.Н., Шульга В.Д., Колосков Ю.М. Новый способ и техническое средство для омолаживания защитных лесных насаждений в аридных регионах страны // *Аридные экосистемы*. -2011. -№4 (49): 63-69.
13. Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2025 года, переработанная и дополненная / К. Н. Кулик [и др.]; ФНЦ агроэкологии РАН. – Волгоград, 2018. – 36 с.
14. Кретинин В.М. Агроресоводство на опустыненных землях // *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. -2016. -№ 67. -С. 153-156.
15. Мальсагов И.И. Агроресоводство как комплексный подход по охране окружающей среды и рационального природопользования // *Инновации. Наука. Образование*. -2022.- № 61. -С. 22-26.
16. Постановление Совета Министров СССР и ЦК ВКП(б) от 20 октября 1948 года № 3960. Url.: <https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/387810-postanovlenie-soveta-ministrov-sssr-i-tsentralnogo-komiteta-vkp-b-o-plane-polezaschitnyh-lesonasazhdeniy-vnedreniya-travopolnyh-sevooborotov-stroitelstva-prudov-i-vodoyomov-dlya-obespecheniya-vysokih-i-ustoychivyh-urozhaev-v-stepnyh-i-lesostepnyh-razo>
17. Концепция реализации природно-климатических проектов в Российской Федерации: монография /С. С. Морковина, Е.А. Панявина, А. В. Иванова [и др.]. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – 160 с. – ISBN 978-5-7994-1083-4.
18. Рыбакова Н.А. Оценка водоохранной роли агроресомелиоративных насаждений Европейской лесостепи // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. – 2017. – Т. 28, № 5. – С. 5-20. – DOI 10.21513/0207-2564-2017-5-5-20.

Природопользование

19. Дормидонтова Н.В., Проездов П.Н., Розанов А. В. Воздействие агролесомелиоративных насаждений и удобрений на продуктивность пастбищ в степи Приволжской возвышенности//Иновации природообустройства и защиты окружающей среды: Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 23–24 января 2019 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «КУБиК», 2019. – С. 635-639.

20. Тимерьянов А.Ш. Влияние агролесомелиоративных насаждений на стоимость сельскохозяйственных угодий // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2010. – № 3. – С. 43-48.

21. Mosquera-Losada M.R., Santiago-Freijanes J., Rois M. et al. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*. 2018; 78:603–613. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.06.052

22. Ивонин В. М. Теоретическая концепция агролесомелиоративных систем// Орошаемое земледелие. – 2024. – № 1(44). – С. 59-64. – DOI 10.35809/2618-8279-2024-1-9.

23. Batjes N.H., Sombroek W.G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biol.* 1997; 3: 161-173.

24. Watson R.T, Noble I.R, Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D. J. (eds) Land use, land use changes and forestry: A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 375 p.

25. Елисеев И.А., Бунькова, Н. П. Формирование древесной растительности на различных видах сельскохозяйственных угодий в условиях Южной подзоны тайги // Леса России и хозяйство в них. – 2024. – № 1(88). – С. 75-82. – DOI 10.51318/FRET.2023.88.1.007.

26. Щукин С. В., Голубева А. И., Дорохова В. И., Дугин А. Н. Рекомендации по вовлечению в хозяйственный оборот неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения // Вестник АПК Верхневолжья. – 2018. – № 1(41). – С. 87-98.

27. Морковина С.С., Иванова А.В., Моисеев П.С. Потенциал и возможности агролесоводства на неиспользуемых землях сельскохозяйственного назначения / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2024. – Т. 12. -№4(67)- С. 62-85.

References

1. FAO. Agroforestry and tenure / Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, 2022. 168 p. Url.: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc2705en>

2. Cretin V. M. Agroforestry. Volgograd: Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 2021. 268 p. ISBN 978-5-6044587-6-1. (in Russ.)

3. Modeling of the vertical structure of shade trees in cacao agroforestry systems / B. Sánchez-Díaz, L. Ríos-Rodas, A. Sol-Sánchez [et al.] *Theoretical and Applied Ecology*. 2023; 1:28-37. – DOI 10.25750/1995-4301-2023-1-028-037.

4. Worku A. The Role of Agroforestry in Ecosystem Services and Mitigation of Climate Change. *Vegetable Crops of Russia*. 2024; 4:11-119. – DOI 10.18619/2072-9146-2024-4-111-119.

5. Santoro A., Venturi M., Bertani R., Agnoletti M. A review of the role of forests and agroforestry systems in the FAO Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) programme. *Forests*. 2020;11(8):860.

6. Kay S., Rega C., Moreno G., Szerencsits E., den Herder M., Palma J. H. N., Herzog F. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*. 2019; 83: 581-593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>

7. Smith J., Pearce, B.D., Wolfe M.S. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2022; 37(1): 5-17. <https://doi.org/10.1017/S1742170520000350>

8. Cardinae R. et al. Carbon sequestration in agroforestry systems-a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2017. 37, 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0442-2>

9. Mosquera-Losada, M.R., Moreno, G., den Herder, M. et al. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*. 2022. Vol. 119, 106524. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106524>
10. Torralba M., Fagerholm N., Burgess, P.J., Moreno, G., Plieninger T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems, Environment*. 2016; 230:150-161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
11. Wilson M.H., Lovell S.T. Agroforestry—The Next Step in Sustainable and Resilient Agriculture. *Sustainability*. 2016; 8(6), 574. <https://doi.org/10.3390/SU8060574>
12. Zhdanov Ju.M., Horoshavin V.N., Shul'ga V.D., Koloskov Ju.M. *Novyj sposob i tehicheskoe sredstvo dlja omolazhivaniya zashhitnyh lesnyh nasazhdenij v aridnyh regionah strany* [A new method and technical means for rejuvenating protective forest plantations in arid regions of the country]. *Aridnye jekosistemy= Arid ecosystems*. 2011; №4 (49): 63-69. (in Russ.)
13. Strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation for the period up to 2025, revised and supplemented / K. N. Kulik [et al.]; Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, 2018.36 p. (in Russ.)
14. Kretinin V.M. *Agrolesovodstvo na opustynennyh zemljah* [Agroforestry on desolate lands]. *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo centra RAN=Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016; 67:153-156. (in Russ.)
15. Mal'sagov I.I. *Agrolesovodstvo kak kompleksnyj podhod po ohrane okruzhajushhej sredy i racional'nogo prirodopol'zovaniya* [Agroforestry as an integrated approach to environmental protection and rational use of natural resources]. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie = Innovation. Science.Education*. 2022; 61:22-26. (in Russ.)
16. Resolution of the Council of Ministers of the USSR and the Central Committee of the CPSU(b) dated October 20, 1948 No. 39608 Url.: <https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/387810-postanovlenie-soveta-ministrov-sssr-i-tsentralnogo-komiteta-vkp-b-o-plane-polezaschitnyh-lesonasazhdeniy-vnedreniya-travopolnyh-sevooborotov-stroitelstva-prudov-i-vodoyomov-dlya-obespecheniya-vysokih-i-ustoychivyh-urozhaev-v-stepnyh-i-lesostepnyh-rayo> (in Russ.)
17. The concept of implementing natural and climatic projects in the Russian Federation: a monograph /S. S. Morkovina, E.A. Panyavina, A.V. Ivanova [et al.]. Voronezh: Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, 2023. 160 p. ISBN 978-5-7994-1083-4. (in Russ.)
18. Rybakova N.A. *Ocenka vodoohrannoj roli agrolesomeliorativnyh nasazhdenij Evropejskoj lesostepi* [Assessment of the water protection role of agroforestry plantations in the European forest steppe]. *Problemy jekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya jekosistem =Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling*. 2017; 28 (5): 5-20. DOI 10.21513/0207-2564-2017-5-5-20. (in Russ.)
19. Dormidontova N. V., Proezdov P.N., Rozanov A.V. *Vozdejstvie agrolesomeliorativnyh nasazhdenij i udobrenij na produktivnost' pastbishh v stepi Privolzhskoj vozvyshehnosti* [The impact of agroforestry plantations and fertilizers on the productivity of pastures in the steppe of the Volga upland]. *Innovacii prirodoobustrojstva i zashhity okruzhajushhej sredy: Materialy I Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Saratov, 23–24 janvarja 2019 goda. – Saratov: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju Izdatel'stvo «KUBiK»= Innovations in environmental management and environmental protection: Proceedings of the First National Scientific and Practical Conference with International Participation, Saratov, January 23-24, 2019. Saratov: Limited Liability Company, KUBiK Publishing House, 2019: 635-639. (in Russ.)*
20. Timer'janov A.Sh. *Vlijanie agrolesomeliorativnyh nasazhdenij na stoimost' sel'skohozjajstvennyh ugodij* [The influence of agroforestry plantations on the cost of agricultural land]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta =Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2010; 3:43-48. (in Russ.)
21. Mosquera-Losada M.R., Santiago-Freijanes J., Rois M. et al. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*. 2018; 78:603–613. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.06.052

Природопользование

22. Ivonin V.M. *Teoreticheskaja koncepcija agrolesomeliorativnyh sistem* [Theoretical concept of agroforestry systems]. *Oroshaemoe zemledelie = Irrigated agriculture*. 2024; 1(44): 59-64. DOI 10.35809/2618-8279-2024-1-9. (in Russ.)

23. Batjes N.H., Sombroek W.G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biol.* 1997; 3: 161-173.

24. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D. J. (eds) *Land use, land use changes and forestry: A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 375 p.

25. Eliseev I.A., Bun'kova, N. P. *Formirovanie drevesnoj rastitel'nosti na razlichnyh vidah sel'skhozjajstvennyh ugodij v uslovijah Juzhnoj podzony tajgi* [The formation of woody vegetation on various types of agricultural land in the conditions of the Southern taiga subzone]. *Lesa Rossii i hozjajstvo v nih = Forests of Russia and agriculture in them*. 2024; 1(88): 75-82. DOI 10.51318/FRET.2023.88.1.007. (in Russ.)

26. Shhukin S. V., Golubeva A. I., Dorohova V. I., Dugin A. N. *Rekomendacii po povlecheniju v hozjajstvennyj oborot neispol'zuemyh zemel' sel'skhozjajstvennogo naznacheniya* [Recommendations on the involvement of unused agricultural land in economic turnover]. *Vestnik APK Verhnevolzh'ja = Bulletin of the Agro-industrial complex of the Upper Volga region*. 2018; 1(41): 87-98. (in Russ.)

27. Morkovina S.S., Ivanova A.V., Moiseev P.S. *Potencial i vozmozhnosti agrolesovodstva na neispol'zuemyh zemljah sel'skhozjajstvennogo naznacheniya* [The potential and possibilities of agroforestry on unused agricultural lands]. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika = Current research directions of the 21st century: theory and practice*. 2024; 2 (4(67)): 62-85. (in Russ.)

Сведения об авторах

✉ *Морковина Светлана Сергеевна* – доктор экономических наук, профессор, проректор по науке и инновациям, заведующий кафедрой менеджмента и экономики предпринимательства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3776-5181>, e-mail: tc-sveta@mail.ru

Моисеев Павел Сергеевич – кандидат экономических наук, докторант кафедры менеджмента и экономики предпринимательства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2955-0324>, e-mail: post@tsutmb.ru

Писарев Андрей Евгеньевич – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-0761-5940>, e-mail: jeyandrey@gmail.com

Information about the authors

✉ *Svetlana S. Morkovina* – Dr. Sci. (Economics), Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Head of the Department of Management and Economics of Entrepreneurship, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3776-5181>, e-mail: tc-sveta@mail.ru

Pavel S. Moiseev – Candidate of Economic Sciences, Doctoral Student of the Department of Management and Economics of Entrepreneurship, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2955-0324>, e-mail: post@tsutmb.ru

Andrey E. Pisarev – Postgraduate Student of the Department of Ecology, Forest Protection and Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-0761-5940>, e-mail: jeyandrey@gmail.com

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/16>

УДК 630.181:630.23:001.89



Сравнительная характеристика используемого лесопосадочного материала при лесовосстановлении

Игорь И. Шанин✉, kingoao@mail.ru, 0000-0003-4706-9868

Анатолий А. Штондин, 0000-0002-9924-2004

Екатерина В. Кузнецова, lesteh_nauka@mail.ru, 0009-0007-9032-5819

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

Аннотация

Ежегодно лесное хозяйство страны испытывает влияние различных факторов на лесные ресурсы. В первую очередь пагубное воздействие на лесные территории оказывают лесные пожары, которые ежегодно уничтожают тысячи гектар леса. По данным Рослесхоза динамика лесных пожаров в 2023 году показывает тенденцию к снижению, где лесная площадь, охваченная огнем составила 4,6 тыс.га, но в 2024 году уже этот показатель был зафиксирован на отметке – 6.1 млн.га. В этих условиях можно отметить, что динамика лесовосстановительных работ характеризуется отставанием от гибели лесных насаждений. В статье проанализированы основные показатели, отражающие общую площадь погибших лесных насаждений и объем лесовосстановительных работ на территории РФ по Федеральным округам. Предложена авторская модель осуществления лесовосстановительных работ с учетом влияния различных условий. Проанализированы планы лесовосстановления пяти филиалов, конкретной организации, осуществляющей переданные полномочия в области лесного хозяйства. В исследовании проведена сравнительная оценка применения классического и инновационного лесопосадочного материала. Предложено и обосновано использование инновационного посадочного материала с ЗКС при лесовосстановительных работах, более устойчивого к природным и климатическим условиям в сравнении с классическим посадочным материалом с ОКС. Проведена сравнительная экономическая оценка типов посадочного материала, на основе литературных источников определен процент приживаемости и сделан вывод, что инновационные лесопосадочные сеянцы с ЗКС обходятся по стоимости дороже, чем с ОКС, но это условие компенсируется степенью приживаемости лесных культур при использовании инновационного посадочного материала.

Ключевые слова: лесные пожары, лесное хозяйство, лесовосстановление, инновационный посадочный материал, сеянцы, лесной участок, проект лесовосстановления.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-01856, <https://rscf.ru/project/23-28-01856/>

Конфликт интересов: автор(ы) заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шанин, И. И. Сравнительная характеристика используемого лесопосадочного материала при лесовосстановлении / И. И. Шанин, А. А. Штондин, Е. В. Кузнецова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 2 (58). – С. 263-279. – Библиогр.: с. 277-278 (12 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/16>.

Поступила 12.01.2025. **Пересмотрена** 14.05.2025. **Принята** 16.06. 2025. **Опубликована онлайн** 26.06.2025.

Comparative characteristics of forest planting material used in reforestation

Igor I. Shanin✉, kingoao@mail.ru, 0000-0003-4706-9868

Anatoly A. Shtondin, 0000-0002-9924-2004

Ekaterina V. Kuznetsova, lesteh_nauka@mail.ru, 0009-0007-9032-5819

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

Abstract

Every year, the country's forestry is affected by various factors on forest resources. First of all, forest fires have a detrimental effect on forest areas, annually destroying thousands of hectares of forest. According to the Federal Forestry Agency, the dynamics of forest fires in 2023 shows a downward trend, where the forest area engulfed in fire was 4.6 thousand hectares, but in 2024 this figure was already recorded at 6.1 million hectares. Under these conditions, it can be noted that the dynamics of forest restoration work is characterized by a lag behind the death of forest plantations. The article analyzes the main indicators reflecting the total area of dead forest plantations and the volume of forest restoration work on the territory of the Russian Federation by Federal Districts. The author's model for implementing forest restoration work is proposed, taking into account the influence of various conditions. The reforestation plans of five branches, a specific organization exercising delegated powers in the field of forestry are analyzed. The study provides a comparative assessment of the use of classical and innovative forest planting material. The use of innovative planting material with a closed root system in forest restoration works, which is more resistant to natural and climatic conditions in comparison with the classic planting material with an open root system, is proposed and substantiated. A comparative economic assessment of the types of planting material is carried out, the percentage of survival is determined based on literary sources and a conclusion is made that innovative forest planting seedlings with a closed root system are more expensive than those with an open root system, but this condition is compensated by the degree of survival of forest crops when using innovative planting material.

Keywords: forest fires, forestry, reforestation, innovative planting material, seedlings, forest plot, reforestation project

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation (RSF), grant № 23-28-01856, <https://rscf.ru/en/project/23-28-01856/>.

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

For citation: Shanin I. I., Shtondin A. A., Kuznetsova E. V. (2025) Comparative characteristics of forest planting material used in reforestation. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 2 (58), pp. 263-279 (in Russian). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/16>.

Received 12.01.2025. **Revised** 14.05.2025. **Accepted** 16.06.2025. **Published online** 26.06.2025.

Введение

Под лесовосстановлением в научных источниках литературы понимается процесс осуществления комплекса ручных и механизированных работ

по возобновлению лесных площадей, ранее утраченных, вырубленных и покрытых лесной растительностью. Согласно действующим нормативно-право-

вым актам (НПА), существуют три основные способа лесовосстановления, к ним относят: естественное, искусственное, комбинированное лесовосстановление. [1]. Естественное лесовосстановление рассматривается как комплексный механизм возобновления лесных площадей, который осуществляется в следствии положительного влияния на лесные массивы природных явлений и процессов, а также комплекса принимаемых мер, оказывающих возможность содействия росту леса. Искусственное лесовосстановление представляет собой посадку лесных культур с помощью ручного труда или механизированных устройств и машин, с применением классических и инновационных методов. Комбинированное лесовосстановление сочетает в себе условия естественного и применяемые подходы при искусственном лесовосстановлении [2,6].

В исследовании представлена модель осуществления лесовосстановительных работ с учетом влияния различных условий. В данной модели отражены три основных метода лесовосстановления в условиях основных четырех групп лесовосстановительных работ. На процесс лесовосстановления оказывают влияние различные факторы и условия, к ним можно отнести: природно-климатические (влажность почв, эрозия ветров, засушливость), экологические (выбросы парниковых газов, загрязнение окружающей среды, нарушение биогеоценоза) и территориально-ландшафтные (болотистые местности, склоны, овраги, горные территории).

Осуществление лесовосстановления на вырубках рассматривается как достаточно сложный процесс возобновления лесных ресурсов. После проведения сплошных вырубок происходит гибель значительной части продуктивного лесного подростка, который содействует естественному лесовосстановлению [10,12]. Машины и механизированные устройства используемые оказывают пагубное воздействие на лесной подрост, т.к. при лесосечных работах происходит нарушение живого напочвенного покрова в верхних слоях почвах и лесной подстилки. Перед лесовосстановительными работами после

сплошных рубок осуществляются работы по уборке захламленных территорий от лесорубочных остатков и удаление пней из земли.

Модель осуществления лесовосстановительных работ с учетом влияния различных условий представлена на рисунке 1.

Представленная модель учитывает при проведении лесовосстановительных работ блок методов, необходимых для конкретной лесной территории, например, на труднодоступных территориях, больше подойдут методы естественного лесовосстановления. В условиях снижения углеродного следа более предпочтительны методы ускоренного лесовосстановления на основе применения усовершенствованных генотипов лесных пород. В то же время, при лесовосстановительных работах, стоит уделить внимание факторам и условиям их обуславливающим. Модель содержит 3 группы условий, которые учитывают влияние различных факторов при лесовосстановительных работах и применяемых способах, в контексте повышения эффективности лесовосстановительных мероприятий.

Поэтому при естественном лесовосстановлении ключевой задачей выступает применение оптимального способа рубки и очистки лесных площадей от захламленности. Сохранение продуктивного лесного подростка или «подроста лесной предварительной генерации» выступает оптимальным условием естественного лесовосстановления [5]. Здесь немаловажную роль необходимо отводить качеству проведения механизированных работ на лесосеках и возможности адаптации естественного подростка к постоянно изменяющимся экологическим условиям. Возможность продуктивного лесного подростка в дальнейшем адаптироваться в новых экологических условиях для обеспечения оптимального роста и формирования фонда древесной растительности зависит от ряда показателей, к которым можно отнести, возрастная группа, полнота ранее срубленного древостоя, густота, условия произрастания леса, территориальные особенности и тип почвы.

Природопользование

Результаты исследования и их обсуждение

На территории РФ ежегодно гибнут тысячи гектар лесных насаждений, в основном в следствии лесных пожаров, возникающих на значительных по площади лесных территориях. Количество лесных пожаров, как и прохождение их по площади, значительно отличается в каждом конкретном регионе.

Наибольшее количество лесных пожаров фиксируется в лесных регионах, в малолесных регионах лесные пожары имеют точечный характер. В таблице 1 представлена динамика погибших лесных насаждений вследствие лесных пожаров, по Федеральным округам.

Таблица 1

Динамика погибших лесных насаждений вследствие лесных пожаров, за 2019-2023 годы, га

Table 1

Dynamics of forest stands lost due to forest fires, for 2019-2023, ha

Показатели / Периоды Indicators / Periods	2019	2020	2021	2022	2023	ТР, 2023 / 2019, %
Размер лесной площади, пройденной огнём, тыс.га Size of forest area affected by fire, thousand hectares	10078,5	9267,7	10059,3	3345,7	4545,9	45,11
Общая площадь погибших лесных насаждений, га Total area of dead forest stands, ha	169103	145458	104024,1	188236,8	125407,0	74,16
ЦФО CFD	8552	9736	16418,0	10782,8	9940,6	116,24
% к общей площади % of total area	5,06	6,69	15,78	5,73	7,93	156,74
СЗФО NWFD	6793	2397	19218,5	65073,4	2600,9	38,29
% к общей площади % of total area	4,02	1,65	18,48	34,57	2,07	51,63
ЮФО SFD	1517	1933	2126,4	1748,1	2041,1	134,55
% к общей площади % of total area	0,90	1,33	2,04	0,93	1,63	181,43
СКФО NKFD	197	452	558,5	279,5	306,8	155,74
% к общей площади % of total area	0,12	0,31	0,54	0,15	0,24	210,00
ПФО VFD	7945	4709	3598,4	4030,7	3915,8	49,29
% к общей площади % of total area	4,70	3,24	3,46	2,14	3,12	66,46
УФО UFO	11820	8639	21439,0	34853,8	15382,0	130,14
% к общей площади % of total area	6,99	5,94	20,61	18,52	12,27	175,48
СФО SFO	95789	93039	23977,6	38999,4	37900,3	39,57
% к общей площади % of total area	56,65	63,96	23,05	20,72	30,22	53,35
ДФО FEFD	36490	24553	16687,7	32469,1	53319,5	146,12
% к общей площади % of total area	21,58	16,88	16,04	17,25	42,52	197,03

Источник: составлено авторами по данным Росстата

Source: compiled by the authors based on Rosstat data

По данным таблицы 1 можно увидеть, что размер лесных площадей, пройденных огнём снижается, темп роста по итогам 2023 года в сравнении с 2019 годом составил 45%, в отчетный период лесные пожары затронули 4545,93 тыс.га, но в сравнении с

2022 годом (3345,7 тыс.га) наблюдается рост площадей, пройденных огнем. В то же время наблюдается небольшое снижение площади погибших лесных насаждений, если в 2019 году лесных насаждений погибло на площади в 169103 га, то в 2023 общая площадь погибших лесных насаждений составила

Природопользование

125407 га. Но здесь мы также видим, что в 2022 году данный показатель превысил значения всех анализируемых периодов, с общей по площади гибелью лесных насаждений в 188236,8 га. Наиболее всего лесные пожары затронули Дальневосточный и Сибирский Федеральные округа, в 2023 году общая площадь погибших лесных насаждений составила 53319,5 тыс.га и 37900,3 тыс.га., соответственно, что

в общем объеме совокупность погибших лесных насаждений по площади составила 42,5% и 30,2%.

Помимо лесных пожаров на гибель лесных насаждений оказывают различные факторы и условия. Больше всего гибели подвержены хвойные лесные насаждения, которые в общем объеме утраченных лесов составляют 87,1% в 2023 году. В таблице 2 представлены основные причины гибели лесных насаждений, в разрезе Федеральных округов.

Таблица 2

Причины гибели лесных насаждений в 2023 году по Федеральным округам

Table 2

Causes of forest loss in 2023 by Federal Districts

Показатели / Федеральные округа Indicators / Federal Districts	Всего Total	ЦФО CFD	СЗФО NWFD	ЮФО SFD	СКФО NKFD	ПФО VFD	УФО UFO	СФО SFO	ДФО FEFD
1. Всего утрачено лесных насаждений, га Total forest loss, ha	125407,0	9940,6	2600,9	2041,1	306,8	3915,8	15382,0	37900,3	53319,5
1.1 Из них, хвойные, га Total forest loss, ha	109232,9	7640,3	2305,7	1081,3	104,3	2291,3	11938,7	35016,1	48855,2
% к первому пункту % to the first point	87,10	76,86	88,65	52,98	34,00	58,51	77,61	92,39	91,63
2. Повреждениями вредителями, га Damage by pests, ha	16275,9	608,1	600,9	166,4	1,1	58,1	8,1	14832,8	0,4
% к первому пункту % to the first point	12,98	6,12	23,10	8,15	0,36	1,48	0,05	39,14	0,00
3. Повреждениями лесных обитателей, га Damage to forest inhabitants, ha	31,8	1,7	1,1	2,0	0	16,0	0	11,0	0
4. Болезнями древесных насаждений, га	3074,0	2776,1	1,7	48,7	4,6	45,7	37,3	84,8	75,1
5. Климатическими условиями, га Diseases of tree plantations, ha	13032,8	5478,2	493,6	519,7	196,8	1421,5	82,2	4017,3	823,5
% к первому пункту % to the first point	10,39	55,11	18,98	25,46	64,15	36,30	0,53	10,60	1,54

Природопользование

6. Лесных пожаров, га Forest fires, ha	92914,6	1044,8	1484,9	1304,3	104,3	2373,5	15254,4	18927,9	52420,5
% к первому пункту % to the first point	74,09	10,51	57,09	63,90	34,00	60,61	99,17	49,94	98,31
6.1 Размер лесной площади, пройденной огнём, тыс.га Size of forest area affected by fire, thousand hectares	4,54	0,63	2,98	32,62	0,031	6,05	530,14	192,51	3780,96
7. Различных антропогенных факторов, га Various anthropogenic factors, ha	77,9	31,7	18,7	0	0	1,0	0	26,5	0

Источник: составлено авторами по данным Росстата

Source: compiled by the authors based on Rosstat data

Динамика гибели лесных насаждений по Федеральным округам носит различный характер, например, лесные пожары в основном уничтожают значительную долю лесных насаждений в УФО, СФО и ДФО, 99,2%, 49,9%, 98,3%, соответственно. Различным болезнетворным влияниям подвержены лесные насаждения в Центральном федеральном округе, где из все погибших насаждений в округе, утрачено от болезней древесных насаждений на площади в 2776,1 га, при общем объеме утраченных лесных насаждений по этой причине, по всей стране в 3074 га. Анализируя данный округ также, можно увидеть, что значительная часть лесных насаждений погибла также в следствии влияния различных климатических условий, к ним можно отнести засушливые летние периоды, недостаток снежного покрова зимой. Следовательно, в ЦФО необходимо использовать уникальный инновационный посадочный материал, более устойчивый к болезням и вредителям.

Ежегодно в регионах осуществляются работы по лесовосстановлению утраченных лесных площадей, которые начинаются с расчистки гарей и пней, обработки и подготовки почвы, формирования междурядий механизированным способом и непосредственно, посадка лесных культур. Анализируя динамику площадей, пройденных лесными пожа-

рами и объемов лесовосстановления, можно отметить, что площадь лесных пожаров (4545,93 тыс.га в 2023 году) ежегодно преваляет над площадью посаженных новых деревьев (1 170 тыс.га). На рисунке 2 представлена динамика лесовосстановительных работ по Федеральным округам, за 2021-2023 годы.

Наибольший объем лесовосстановительных работ осуществляется в самых пожароопасных федеральных округах, СФО и ДФО, где ежегодно наблюдается устойчивая лесовосстановительная тенденция от 200 до 350 тыс.га. Так в 2023 году на территории Сибирского федерального округа было восстановлено 335 тыс.га, а на территории Дальневосточного федерального округа лесовосстановительные работы осуществлялись на площади в 295 тыс. га. Оптимальную динамику лесовосстановления демонстрируют Северо-Западный федеральный округ, где было восстановлено лесов на площади 239 909,3 га в 2023 году и Приволжский федеральный округ, где работы по лесовосстановлению проводились на площади 133832,3 га. Наименьший по площади уровень лесовосстановления наблюдается в Северо-Кавказском федеральном округе, где в 2023 году восстановлено лесных территорий на площади в 1971,5 га. Устойчивый рост лесовосстановительных работ показывает Центральный федеральный округ, с общим объемом лесовосстановления в

Природопользование

99 661,5 га, по итогам 2023 года, где годом ранее было восстановлено лишь 85 100,7 га.

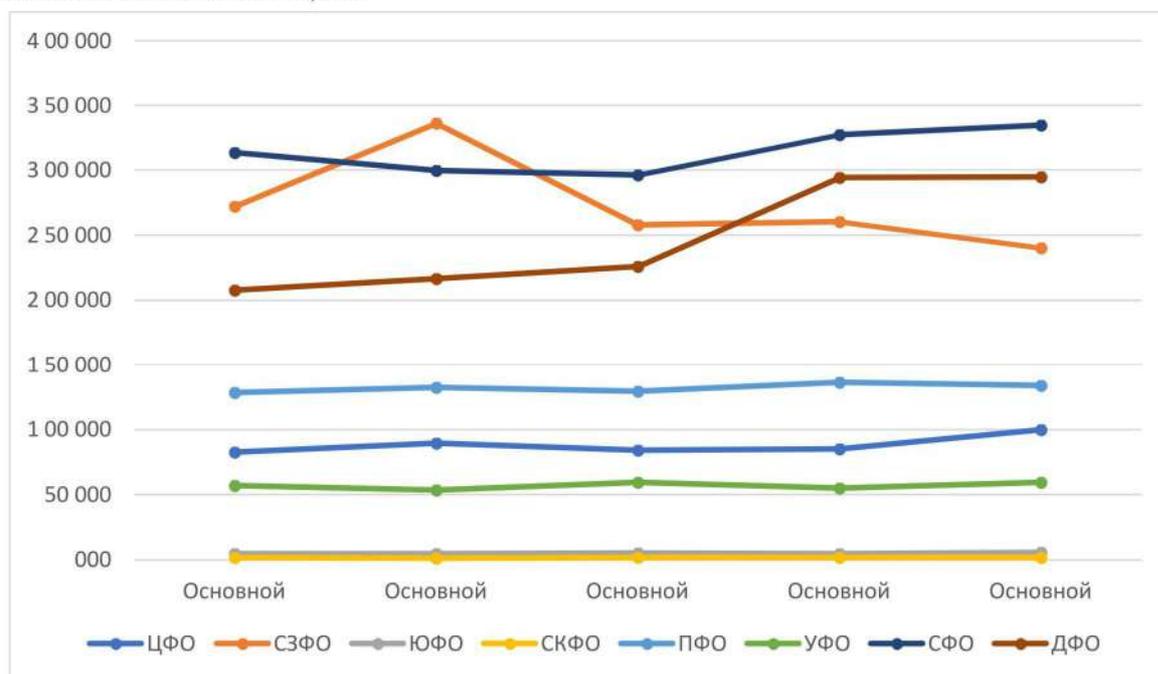


Рисунок 2. Динамика лесовосстановительных работ на территории РФ по Федеральным округам, за 2021-2023 годы

Figure 2. Dynamics of forest restoration work in the territory of the Russian Federation by Federal Districts, for 2021-2023

Источник: составлено авторами по данным Росстата

Source: compiled by the authors based on Rosstat data

На сегодняшний день перед регионами и лесопользователями стоит задача ускоренного лесовосстановления утраченных лесных территорий, вследствие различных факторов, в том числе природных лесных пожаров и повреждения деревьев различными вредителями. В приоритетном порядке осуществляется использование и внедрение модели интенсивного ведения лесного хозяйства, которая обеспечивает непрерывность использования лесных ресурсов, при которой обеспечивается должный уровень поддержания неистощительной эксплуатации лесов, при условии сохранения экологических факторов значимости.

В первую очередь, уделяется внимание новейшим технологиям выращивания посадочного материала. Классические методы искусственного лесовосстановления предполагают выращивание сеян-

цев из собранных семян и выращиваемых в тепличных условиях. Инновационные методы выращивания посадочного материала предполагают выращивание улучшенного посадочного материала с более качественными характеристиками и более устойчивого к условиям внешнего воздействия, обеспечивающие наиболее быстрый рост лесов. При выращивании инновационного посадочного материала применяются новые технологии исследования при определении качественной составляющей посадочного материала [8,12].

Одним из инновационных методов выращивания посадочного материала хорошо себя зарекомендовал метод выращивания с закрытой корневой системой, который повышает его качество и более быстрый рост сеянцев с повышенными характеристиками приживаемости. Обеспечение инновацион-

Природопользование

ным посадочным материалом осуществляется лесными селекционно-семеноводческими центрами в регионах РФ. При выращивании лесопосадочного материала используются инновационные технологии *in vitro* и *in vivo*, формирующие ценные генотипы древесных пород для многолетнего выращивания.

Лесное хозяйство в регионах РФ обеспечивается утвержденными уполномоченными органами государственной власти субъектов Российской Федерации, осуществляющими переданные им в соответствии с частью 1 статьи 83 Лесного кодекса Российской Федерации полномочиями.

В качестве объекта исследования выбрана Московская область, где необходимые полномочия в области лесного хозяйства и лесных отношений осуществляется ГКУ МО «Мособллес». Преимущественно на данной территории используют типовой с открытой корневой системой (ОКС) и инновационный посадочный материал с закрытой корневой системой (ЗКС). В таблицах 3 и 4 приведены основные характеристики, согласно проектам лесовосстановления на выборочных филиалах (Ногинский, Истринский, Сергиево-Посадский, Звенигородский, Талдомский).

Таблица 3

Описание участков, подлежащих лесовосстановлению филиалов ГКУ МО «Мособллес»

Table 3

Description of areas subject to reforestation of branches of the State Institution of the Moscow Region «Mosoblles»

Территориальное лесничество Territorial forestry	№ квартала (выдела) Quarter (section)	Площадь лесовосстановления, га Area of reforestation, ha	Наличие подроста и молодняка Presence of undergrowth and young animals	Уровень задерненности почвы Soil sod level	Степень увлажнения Degree of hydration
Ногинский филиал Noginsk branch	29 (4,5,14,15)	21	нет	средний	Сухой участок
Истринский филиал Istra branch	35-Ч (3,5,8,12)	9,3	нет	средний	Сухой участок
Сергиево-Посадский филиал Sergiev Posad branch	22 (60)	7,8	нет	средний	Сухой участок
Звенигородский филиал Zvenigorod branch	127 (4 (3,6,7,8))	5,35	Имеется: 10С, 9 лет, 1,5 м.	Слабый	Влажный участок
Талдомский филиал Taldom branch	31 (23)	7,3	Имеется: 10Е+Лп, 10 лет, 4 м	Сильный	Сухой участок

Филиалы ГКУ МО «Мособллес» находятся на территории Московской области в границах Центрального федерального округа, лесные участки в большинстве случаев представлены с минимальным уровнем влажности в почве, характеризующиеся засушливым климатом и уровнем задерненности

почвы слабым, сильным и средним. Из пяти лесных участков на анализируемых филиалах, пригодный подрост и молодняки имеются только на двух из них. Далее рассмотрим эксплуатационные характеристики проектов лесовосстановления филиалов ГКУ МО «Мособллес», таблица 4.

Природопользование

Таблица 4

Эксплуатационные характеристики проектов лесовосстановления филиалов ГКУ МО «Мособллес»

Table 4

Operational characteristics of reforestation projects of branches of the State Institution of the Moscow Region «Mosoblles»

Наименование филиала / Характеристики Branch name / Characteristics	Ногинский филиал Noginsk branch	Истринский филиал Istra branch	Сергиево-Посадский филиал Sergiev Posad branch	Звенигородский филиал Zvenigorod branch	Талдомский филиал Taldom branch
Площадь, га Area, ha	21	9,3	7,8	5,35	7,3
Подготовка площади Preparing the area	Да	Да	Да	Нет	Да, частично
Способ Way	Искусственный	Искусственный	Искусственный	Искусственный	Искусственный
Тип посадки Type of landing	Ручной	Механизированный	Ручной	Механизированный	Ручной
Наименование посадочного материала Name of planting material	Ель европейская (обыкновенная)	Ель европейская (обыкновенная)	Ель европейская (обыкновенная)	Сосна	Ель европейская (обыкновенная)
Тип посадочного материала Type of planting material	ЗКС	ОКС	ОКС	ЗКС	ОКС
Возраст, лет Age, years	1-2	От 2	От 2	1-2	От 2
Высота, см. Height, cm.	От 8	От 12	От 12	От 8	От 12
Порода Breed	ЕО	ЕЕ	ЕЕ	Сосна	ЕО
Схема смешения пород Breed Mixing Scheme	- Е-Е-Е-Е	- Е-Е-Е-Е	- Е-Е-Е-Е	-	- Е-Е-Е-Е
Потребность в посадочном материале, на 1 га, тыс. шт. Need for planting material, per 1 ha, th.p.	2 380	3 571	3 571	2 500	3 571
Общее количество посадочного материала, тыс. шт. Total amount of planting material, thousand pieces	49 980	33 210	27 850	13 375	26 070

Природопользование

Источник: Составлено авторами по данным проектов лесовосстановления

Source: Compiled by the authors based on data from reforestation projects

Согласно действующему законодательству, проекты лесовосстановления с применением классического лесопосадочного материала с ОКС должны учитывать небольшой минимальный процент применения более качественного посадочного материала с ЗКС. В целом, согласно проектам лесовосстановления ГКУ МО «Мособллес», полностью осуществляются лесопосадочные работы с применением инновационного посадочного материала с ЗКС

в Ногинском и Звенигородском филиалах, в остальных используются классические процессы лесовосстановления. В качестве основной культуры в проектах лесовосстановления планируется применения на сегодняшний день достаточно дефицитной культуры Ели европейской (обыкновенной). В трех из пяти филиалов запланированы работы ручным способом лесовосстановления.

Таблица 5

Эксплуатационные характеристики проектов лесовосстановления на территории РФ

Table 5

Operational characteristics of forest restoration projects in the territory of the Russian Federation

Наименование лесничества / Характеристики Name of forestry / Characteristics	Сернурское Sernurskoe	Чаадаевское Chaadaevskoe	Бахчисарайское Bakhchisarai	Киренское Kirenskoe	Куменинское сельское Kumenskoe
Площадь, га Area, ha	21,04	2,1	5,0	28,1	1,2
Подготовка площади Preparing the area	Да	Да	Да	Нет	Да
Способ Way	Искусственный	Искусственный	Искусственный	Искусственный	Искусственный
Тип посадки Type of landing	Механизированный	Механизированный	Ручной	Механизированный	Ручной
Наименование посадочного материала Name of planting material	Сосна обыкновенная	Сосна	Дуб черешчатый	Сосна	Ель
Тип посадочного материала Type of planting material	ЗКС	ЗКС	ОКС	Семена I класса	ЗКС
Возраст, лет Age, years	2	1-2	1-2	-	2
Высота, см. Height, cm.	От 8	От 8	От 15	-	От 8
Порода Breed	ЕО	ЕО	5Дч5Яо	-	ЕЕ
Схема смешения пород Breed Mixing Scheme	- Е-Е-Е-Е	С-С-С-С-С-С-С	Дч-Яо-Дч-Яо	С-С-С	Е-Е-Е

Природопользование

Потребность в посадочном материале, на 1 га, тыс. шт. Need for planting material, per 1 ha, th.p.	2500	2,564	2,785	1900	2000
Общее количество посадочного материала, тыс. шт. Total amount of planting material, thousand pieces	52600	5384	13925	53390	2400

Каждый лесной питомник предлагает свою уникальную товарную продукцию в виде классического и инновационного посадочного материала. Средняя стоимость одного сеянца с ОКС составляет 7,4 рублей за 1 штуку, один сеянец инновационного посадочного материала с ЗКС обойдется 13,5 рублей за 1 единицу.

Существенную разницу в цене сыграл дефицит сеянцев с ЗКС, который вызван повышенным

интересом к данному виду инновационной продукции, а также выходом новых положений по компенсационному лесовосстановлению, начиная с 2022 года, при которых, в проектах лесовосстановления необходимо осуществлять данные работы, высаживая сеянцы в соответствии с необходимым процентным соотношением с ОКС и ЗКС (Рисунок 3).



Рисунок 3. Сеянцы с ОКС и ЗКС

Figure 3. Seedlings with open root system and closed root system

Природопользование

Инновационные сеянцы с ЗКС поставляются в кассетах или в био-разлагаемых мешочках с земельным грунтом, которые снижают физическое воздействие на сам сеянец и тем самым увеличивается скорость посадки в 2 раза, также приживаемость сеянцев в мешке с грунтом на 43% выше, чем классического посадочного материала с ОКС, которая достигается за счет минимизации механических повреждений корней сеянцев при транспортировке

и посадочных работ. Также больший процент приживаемости обеспечивается за счет того, что сеянцы в тканевом контейнере погружаются в грунт и длительный период сохраняют влагу, что способствует их закреплению на посадочной площади. При этом инновационные сеянцы с ЗКС при правильных условиях их использования могут обеспечивать приживаемость до 100%, средний процент выживаемости составляет – 86% [4], а приживаемость сеянцев с ОКС составляет – 59,8% [3,4].

Таблица 5

Сравнительная оценка применения классического и инновационного лесопосадочного материала

Table 5

Comparative assessment of the use of classical and innovative forest planting material

Наименование филиала / Характеристики Branch name / Characteristics	Ногинский филиал Noginsk branch	Истринский филиал Istra branch	Сергиево- Посадский филиал Sergiev Posad branch	Звенигородск ий филиал Zvenigorod branch	Талдомский филиал Taldom branch
Площадь, га Area, ha	21	9,3	7,8	5,35	7,3
Тип посадочного материала Type of planting material	ЗКС	ОКС	ОКС	ЗКС	ОКС
Приживаемость Survival rate, %	86	59,8	59,8	86	59,8
Необходимое количество посадочного материала, на 1 га, тыс. шт. Required amount of planting material per 1 ha, thousand pieces	2 380	3 571	3 571	2 500	3 571
Общее количество посадочного материала, тыс. шт. Total amount of planting material, thousand pieces	49 980	33 210	27 850	13 375	26 070
Стоимость классического посадочного материала с ОКС на 1 га, р. Cost of classic planting material with open root system per 1 ha, r.	17612	26425,4	26425,4	18500	26425,4
Общая стоимость сеянцев с ОКС, р. Total cost of seedlings with open root system, r.	369852	245754	206090	98975	192918
С учетом компенсации не прижитых сеянцев (43%)	528888,4	351428,2	294708,7	141534,3	275872,7

Природопользование

Taking into account compensation for seedlings that did not survive (43%)					
Стоимость инновационного посадочного материала с ЗКС на 1 га, р. Cost of innovative planting material with closed root system per 1 ha, r.	17612	26425,4	26425,4	18500	26425,4
Общая стоимость сеянцев с ЗКС, р. Total cost of seedlings with closed root system, r.	674730	448335	375975	180562,5	351945
Уровень отклонения затрат на материал ЗКС к ОКС Level of deviation of costs for ZKS material to OKS, %	12,8				

Как видно из таблицы 5, использование инновационных сеянцев с ЗКС более устойчивых к природным и климатическим условиям, а также характеризующихся повышенным уровнем приживаемости, позволит повысить эффективность лесовосстановительных работ. По стоимости посадочного материала, инновационный материал с ЗКС обойдется с небольшой разницей на 12,8% дороже классического посадочного материала с ОКС. Данное процентное соотношение компенсируется стоимостью механизированных и ручных работ. Учитывая, что приживаемость посадочного материала с ОКС ниже на 43%, чем с ЗКС, то необходимо потом проводить дополнительные работы по компенсационной посадке не прижитых сеянцев, что требует дополнительных финансовых затрат, связанных непосредственно с транспортировкой, доставкой и высадкой посадочного материала взамен не прижитого.

Поэтому при лесовосстановлении организациям стоит обратить внимание на повышение объема инновационных сеянцев с ЗКС при посадках, которые обеспечивают наиболее быстрый рост, проведение лесовосстановительных работ в один прием при условии соблюдения всех технологий высаживания посадочного материала.

Заключение

В текущих условиях необходимо осуществлять взаимовыгодное сотрудничество между органами власти, бизнесом и учеными, в направлении снижения числа лесных пожаров и применения инновационных методов лесовосстановления. Стоит обратить внимание на применение при лесовосстановительных работах более качественного и улучшенного по своим характеристикам инновационного посадочного материала. Современная лесная наука позволяет сформировать оптимальные генотипы древесных растений, для конкретных районов с индивидуальными условиями произрастания, например, методами *in vitro* и *in vivo* в селекционных лабораториях можно вывести улучшенные сорта лесных пород, способных обеспечить приживаемость в различных территориально-климатических особенностях и противостоять влиянию различных факторов. Немаловажным аспектом при лесовосстановительных работах выступает применение механизированных машин и устройств. На участках, где имеется естественный подрост и молодняки необходимо использовать более оптимальные технологии с применением инновационных устройств и механизмов, предотвращающих уничтожение или повреждение подроста. Таким образом, в рамках проведенного исследования, можно

Природопользование

сделать вывод, что для ГКУ МО «Мособллес» с учетом территориальных, климатических условий и состояния почвы оптимальным будет переход на инновационные методы лесовосстановления с приме-

нением инновационного лесопосадочного материала с ЗКС, оптимизированного для данных территориальных особенностей.

Список литературы

1. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления [Электронный ресурс], режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/728111110> (дата обращения: 17.10.2024).

2. Залесов С.В. Лесоводство: учебник / С.В. Залесов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. – 295 с.

3. Гладин А.Н., Коновалова Е.В., Содбоева С.Ч. Сравнительные результаты использования сеянцев сосны обыкновенной с открытой и закрытой корневой системой при искусственном лесовосстановлении в условиях западного Забайкалья // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 11. – С. 7-12.

4. Казаков В.И., Проказин Н.Е., Мартынюк А.А., Лобанова Е.Н., Казаков И.В., Дручинин Д.Ю. Создание культур сосны сеянцами с открытой и закрытой корневой системой на горельнике в лесостепной зоне // Лесохозяйственная информация. 2023. № 4. С. 53–60

5. Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов. – М.: Наука, 1966. – 64 с.

6. Луганский Н.А. Лесоведение: учебное пособие / Н.А. Луганский, С.В. Залесов, В.Н. Луганский. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – 432 с.

7. Шанин И.И., Морковина С.С., Третьяков А.Г. Потенциал земельных ресурсов субъектов РФ для целей реализации лесоклиматических проектов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2023. -Т. 11 -№1 (60). - С. 188-198.

8. Балданова Л.П. Оценка реализации компенсационного лесовосстановления на примере Иркутской области // Известия Байкальского государственного университета. -2022. Т. 32. -№2. -С. 407-414.

9. Строганова К.Р., Шанин И.И. Сравнительный анализ используемых методов лесовосстановления зелёных зон Российской Федерации // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. -2020. - Т. 8. - № 2 (49). - С. 24-29.

10. Bayne K.M., Grant A. Who cares what happens with planted forests? A public typology to assist community engagement and communication. Forest Policy and Economics. 2024; 169: 103332, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103332>.

11. Fatima S., Abbas S., Rebi A., Ying Z. Sustainable forestry and environmental impacts: Assessing the economic, environmental, and social benefits of adopting sustainable agricultural practices. Ecological Frontiers. 2024; 44 (6): 1119-1127, <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.05.009>.

12. Andrew F. Fieldsend, Evelien Cronin, Eszter Varga, Szabolcs Biró, Elke Rogge Organisational Innovation Systems for multi-actor co-innovation in European agriculture, forestry and related sectors: Diversity and common attributes. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2020; 92:100335. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100335>.

References

1. On approval of the Rules for reforestation, the form, composition, procedure for approving a reforestation project, grounds for refusing to approve it, as well as requirements for the format in electronic form of a reforestation project [Electronic resource], access mode: <https://docs.cntd.ru/document/728111110> (date of access: 10/17/2024).

2. Zalesov, S.V. Forestry: textbook. Ekaterinburg: USLTU, 2020. 295 p.

Природопользование

3. Gladinov A.N., Konovalova E.V., Sodboeva S.Ch. Comparative results of the use of Scots pine seedlings with open and closed root systems in artificial reforestation in the conditions of Western Transbaikalia. Successes of modern natural science. 2021; 11: 7-12;

4. Kazakov V.I., Prokazin N.E., Martynyuk A.A., Lobanova E.N., Kazakov I.V., Druchinin D.Yu. Creation of pine crops by seedlings with open and closed root systems on burnt forest in the forest-steppe zone. Text: electronic. Forestry information. 2023; 4:53–60.

5. Pobedinsky A.V. Study of forest restoration processes. Moscow: Nauka, 1966. 64 p.

6. Lugansky, N.A. Forest Science: a tutorial / N.A. Lugansky, S.V. Zalesov, V.N. Lugansky. Yekaterinburg: Ural. state forestry engineering. University, 2010. 432 p.

7. Shanin I.I., Morkovina S.S., Tretyakov A.G. Potential of land resources of the constituent entities of the Russian Federation for the purposes of implementing forest climate projects. Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice. 2023; 11 (1 (60)): 188-198.

8. Baldanova L.P. Assessment of the implementation of compensatory reforestation on the example of the Irkutsk region. Bulletin of the Baikal State University. 2022; 32 (2): 407-414.

9. Stroganova K.R., Shanin I.I. Comparative analysis of the used methods of reforestation of green zones of the Russian Federation. Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2020; 8(2 (49)): 24-29.

10. Bayne K.M., Grant A. Who cares what happens with planted forests? A public typology to assist community engagement and communication. Forest Policy and Economics. 2024; 169: 103332, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103332>.

11. Fatima S., Abbas S., Rebi A., Ying Z. Sustainable forestry and environmental impacts: Assessing the economic, environmental, and social benefits of adopting sustainable agricultural practices. Ecological Frontiers. 2024; 44 (6): 1119-1127, <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.05.009>.

12. Andrew F. Fieldsend, Evelien Cronin, Eszter Varga, Szabolcs Biró, Elke Rogge Organisational Innovation Systems for multi-actor co-innovation in European agriculture, forestry and related sectors: Diversity and common attributes. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2020; 92:100335. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100335>.

Сведения об авторах

✉ *Шанин Игорь Игоревич* – кандидат экон. наук, доцент кафедры экономики и финансов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4706-9868>, e-mail: kingoao@mail.ru.

Штондин Анатолий Александрович – кандидат экон. наук, доцент кафедры экономики и финансов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9924-2004>.

Кузнецова Екатерина Вячеславовна – мл. научный сотрудник, преподаватель кафедры экономики и финансов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: lesteh_nauka@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Igor I. Shanin* – candidate of economics. Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Finance, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4706-9868>, e-mail: kingoao@mail.ru

Anatoly A. Shtondin – candidate of economics. Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Finance, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9924-2004>.

Природопользование

Ekaterina V. Kuznetsova – junior researcher, Lecturer of the Department of Economics and Finance, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: lesteh_nauka@mail.ru.

✉ - Для контактов/Corresponding

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2025 Том 15 № 2 (58)

Подписано в печать 25.06.2025. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет 27.06.2025. Цена 982 р.

Усл. печ. л. 35,13. Уч.-изд. л. 63,8. Тираж 1000 экз. Заказ 323

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Отпечатано в Участке оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

FORESTRY ENGINEERING JOURNAL

Scientific journal

2025 Vol. 15 № 2 (58)

Signed to be published 25.06.2025. Format 60×90 1/8.

Publication date 27.06.2025. Price 982 rub.

Cond. print. sh. 35,13. Acc.-print. sh. 63,8. Printing 1000 copies. Order 323

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 Technolo-
gies 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

Printed at the Department of Operational Printing of the FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaev str., 10, Voronezh 394087