

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# Лесной журнал

**Научный рецензируемый журнал**

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

1

2026

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

# **Lesnoy Zhurnal**

## **(Russian Forestry Journal)**

**Scientific peer-reviewed journal**

Established in 1833  
Issued as part of the  
“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958  
Published bi-monthly

1

2026

## EDITORIAL BOARD:

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

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



## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>H.L. Sagali, Y. Huang.</i> Remote Monitoring of Land Use in Fragmented Urban Green Space Landscapes in Central Tanzania .....	9
<i>Л.В. Черных, Д.В. Черных, В.Л. Черных.</i> Оценка состояния лесных культур при лесоустройстве .....	30
<i>А.В. Данчева, С.В. Залесов, Е.С. Папулов.</i> Выращивание древесных пород в дендрарии Сибирской лесной опытной станции г. Тюмени .....	50
<i>С.Н. Тарханов, Н.А. Прожерина, Е.А. Пинаевская, Ю.Е. Аганина.</i> Динамика фотосинтетического пигментного комплекса сосны обыкновенной в связи с климатическими факторами на Европейском Севере.....	64
<i>О.А. Конюшатов, С.А. Корчагов, Д.В. Беляков.</i> Лесоводственная оценка мероприятий по сохранению ключевых биотопов на сплошных вырубках в Вологодской области.....	78
<i>Р.Н. Сабиров, В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров.</i> Ветровалы в лесах юго-западной части Сахалина под воздействием циклонов .....	90
<i>Р.Р. Галимов, Р.В. Уразильдин.</i> Характеристика пигментного комплекса листьев <i>Betula pendula</i> Roth. при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона .....	103
<i>Е.В. Желтикова, А.И. Григорьев.</i> Особенности годичного прироста побегов <i>Pinus sylvestris</i> L. в условиях урбанизированной среды.....	121
<i>Н.Н. Теринов, В.В. Побединский, Э.Ф. Герц, А.В. Мехренцев, А.Ф. Урзова, Ю.В. Ефимов.</i> Алгоритм лесообразовательного процесса в ельниках с учетом лесохозяйственных мероприятий .....	134

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, А.Ю. Мануковский, А.Е. Матяшов, Е.В. Поздняков.</i> Характеристики пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском .....	147
<i>С.В. Посыпанов, С.П. Карпачёв.</i> Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц при формировании в воде ...	161

- 
- Я.Д. Ведерников, О.А. Рублева, Е.С. Васильева, Е.Е. Шишкина, А.Г. Гороховский.* Точность формирования прямоугольных шипов способом торцового прессования без базирующей оснастки ..... 174
- C. Muthumala, I. Arunakumara, S. De Silva, A. Alwis, F. Marikar.* The Relationships between Fiber Parameters and Mechanical Properties of Timber Species ..... 190

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

- Ф.В. Лапаев, Л.Г. Махотина.* Технология отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б ..... 201
-



## CONTENTS

## FORESTRY

<i>H.L. Sagali, Y. Huang.</i> Remote Monitoring of Land Use in Fragmented Urban Green Space Landscapes in Central Tanzania .....	9
<i>L.V. Chernykh, D.V. Chernykh, V.L. Chernykh.</i> Assessing the Health of Forest Plantations during Forest Inventory.....	30
<i>A.V. Dancheva, S.V. Zalesov, E.S. Papulov.</i> Cultivation of Tree Species in the Arboretum of the Siberian Forest Experimental Station in the City of Tyumen .....	50
<i>S.N. Tarkhanov, N.A. Prozherina, E.A. Pinaevskaya, Yu.E. Aganina.</i> Dynamics of the Photosynthetic Pigment Complex of Scots Pine in Relation to Climatic Factors in the European North.....	64
<i>O.A. Konyushatov, S.A. Korchagov, D.V. Belyakov.</i> Silvicultural Assessment of Measures to Preserve Key Biotopes in Clear-Cut Areas in the Vologda Region.....	78
<i>R.N. Sabirov, V.A. Melkiy, A.A. Verkhoturov.</i> Windfalls in the Forests of the Southwestern Sakhalin under the Influence of Cyclones .....	90
<i>R.R. Galimov, R.V. Urazgildin.</i> Characteristics of the Pigment Complex of <i>Betula pendula</i> Roth. Leaves in Different Types of Pollution in the South Ural Region.....	103
<i>E.V. Zheltikova, A.I. Grigor'ev.</i> Features of Annual <i>Pinus sylvetris</i> L. Shoot Increment in an Urbanized Environment.....	121
<i>N.N. Terinov, V.V. Pobedinsky, E.F. Gerts, A.V. Mekhrentsev, A.F. Urazova, Yu.V. Efimov.</i> The Algorithm of the Forest Formation Process in Spruce Forests, Taking into Account Forestry Measures.....	134

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT  
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

<i>V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov, V.V. Posmetyev, A.Yu. Manukovskii, A.E. Matyashov, E.V. Pozdnyakov.</i> Characteristics of the Pneumohydraulic Recuperative Conical Device of a Hauling Tractor with a Pole Trailer .....	147
<i>S.V. Posypanov, S.P. Karpachev.</i> Force Alignment of the Ends of Two-Tiered Package Rafting Units during their Formation in Water .....	161

- 
- Ya.D. Vedernikov, O.A. Rubleva, E.S. Vasilyeva, E.E. Shishkina, A.G. Gorokhovsky.* The Accuracy of Forming Rectangular Tenons by End-Pressing without Guiding Tooling..... 174
- C. Muthumala, I. Arunakumara, S. De Silva, A. Alwis, F. Marikar.* The Relationships between Fiber Parameters and Mechanical Properties of Timber Species ..... 190

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

- F.V. Lapaev, L.G. Makhotina.* Technology for Bleaching Secondary Fiber from Waste Paper Grade MS-5B (Old Corrugated Cardboard, OCC) ..... 201
-



Original article

УДК 528:630

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-9-29

## Remote Monitoring of Land Use in Fragmented Urban Green Space Landscapes in Central Tanzania

*Heri Labani Sagali*<sup>1,2</sup>, *Postgraduate Student*; ResearcherID: [P-9598-2018](https://orcid.org/0000-0003-2103-1482),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2103-1482>

*Yingli Huang*<sup>1</sup> , *PhD, Prof.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-1536>

<sup>1</sup>College of Economics & Management, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, China; [sagherry@gmail.com](mailto:sagherry@gmail.com), [hluangnefu@163.com](mailto:hluangnefu@163.com) 

<sup>2</sup>Institute of Rural Development Planning, P.O.Box 138, Dodoma, Tanzania; [heri.sagali@mipango.ac.tz](mailto:heri.sagali@mipango.ac.tz)

---

*Received on February 11, 2025 / Approved after reviewing on May 13, 2025 / Accepted on May 17, 2025*

---

**Abstract.** This research explores how long-term land use and cover changes affect urban ecosystems and local livelihoods. It is focused on the impact of rapid urban expansion on sustainable urban planning. The study has been conducted in Nkonko and Sasilo Wards, Manyoni District, Tanzania, from 1993 to 2023. Remote sensing, GIS, satellite imagery, participatory methods, and field surveys have been used to examine deforestation, urbanization, and ecosystem services, detailing land use and land cover and their impact on local environments and livelihoods. The study has revealed significant urban expansion and increased forest cover, accompanied by a decline in agricultural lands, indicating a shift towards urbanization. The landscape has experienced a 2.88 % rise in forest cover, adding 246.82 km<sup>2</sup>, and a 9 % increase in urban areas, expanding by 222.76 km<sup>2</sup>. In contrast, agricultural lands have decreased by 17.17 %, a reduction of 119.72 km<sup>2</sup>. These changes highlight a transformation in land use patterns, demonstrating a change from traditional agriculture towards urban development and reforestation, reshaping the region's topography and land use dynamics. The research has demonstrated that urbanization and land fragmentation in the Manyoni District has disturbed the ecosystem and the community's socioeconomic structure. It highlights the need for coherent urban planning and sustainable land management. It has emphasized advanced remote sensing and GIS skills in planning and conservation strategies.

**Keywords:** community livelihood, forest changes, GIS, land use change, remote sensing, Tanzania

**Acknowledgment:** The authors would like to acknowledge and thank the China National Key Research and Development Program for funding this research with a grant no. 2022YFF1300503-06.

**For citation:** Sagali H.L., Huang Y. Remote Monitoring of Land Use in Fragmented Urban Green Space Landscapes in Central Tanzania. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 9–29. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-9-29>



Научная статья

## Дистанционный мониторинг землепользования фрагментированных ландшафтов городских зеленых насаждений Центральной Танзании

*Х.Л. Сагали*<sup>1,2</sup>, аспирант; ResearcherID: [P-9598-2018](https://orcid.org/0000-0003-2103-1482),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2103-1482>

*И. Хуанг*<sup>1</sup>✉, д-р наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-1536>

<sup>1</sup>Колледж экономики и управления, Северо-Восточный лесной университет, г. Харбин, Китай, 150040; [sagherry@gmail.com](mailto:sagherry@gmail.com), [hlhuangnefu@163.com](mailto:hlhuangnefu@163.com)✉

<sup>2</sup>Институт планирования сельского хозяйства, а/я 138, г. Додома, Танзания; [heri.sagali@mipango.ac.tz](mailto:heri.sagali@mipango.ac.tz)

Поступила в редакцию 11.02.25 / Одобрена после рецензирования 13.05.25 / Принята к печати 17.05.25

**Аннотация.** Изучено влияние долгосрочных изменений землепользования и растительного покрова на городские экосистемы и образ жизни населения. Основное внимание уделяется быстрому расширению городов и воздействию этого процесса на устойчивое городское планирование. Исследование проводилось в районах Нконко и Сасило округа Маньони, Танзания, с 1993 по 2023 гг. Для анализа обезлесения, урбанизации и экосистемных услуг использовались методы дистанционного зондирования, ГИС-технологии, спутниковые снимки, партисипативные методы и проводились полевые исследования, детализирующие изменения землепользования и растительного покрова и их влияние на местную окружающую среду и население. Выявлено значительное расширение городов и увеличение лесного покрова, сопровождающееся сокращением сельскохозяйственных земель, что указывает на сдвиг в сторону урбанизации. Площадь лесного покрова повысилась на 2,88 %, или на 246,82 км<sup>2</sup>, а городов – на 9 %, или 222,76 км<sup>2</sup>. Территория сельскохозяйственных угодий, напротив, уменьшилась на 17,17 %, или на 119,72 км<sup>2</sup>. Эти изменения свидетельствуют о трансформации моделей землепользования, переходе от традиционного сельского хозяйства к городскому развитию и лесовосстановлению. При этом рельеф региона и динамика землепользования становятся другими. Показано, что урбанизация и фрагментация земель в округе Маньони нарушили экосистему и социально-экономическую структуру сообщества. Подчеркивается необходимость последовательного городского планирования и устойчивого управления земельными ресурсами. Особое внимание уделено методам, базирующимся на использовании материалов дистанционного зондирования и ГИС-технологий при разработке стратегий природопользования.

**Ключевые слова:** образ жизни сообщества, изменения в лесах, ГИС, изменение в землепользовании, дистанционное зондирование, Танзания

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность Китайской национальной программе ключевых исследований и разработок за финансирование данного исследования по гранту № 2022YFF1300503-06.

**Для цитирования:** Sagali H.L., Huang Y. Remote Monitoring of Land Use in Fragmented Urban Green Space Landscapes in Central Tanzania // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 9–29. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-9-29>

*Introduction*

Urban development issues and environmental sustainability are closely related to changes in land use and land cover (LULC), a crucial aspect of the worldwide environmental transformation. The surface of the Earth is significantly altered by this intricate dynamics, which is emphasized by both natural occurrences like floods and wildfires and human activities like agriculture, urbanization, deforestation, and industrialization. LULC changes have far-reaching effects on biodiversity, climatic patterns, soil health, water and air quality, and ecological balance, ultimately affecting the resilience and ecological balance of natural systems [15, 17]. People's quality of life and access to resources are directly impacted by the changes in spatial organization of the cities and regions [4, 58]. The necessity for sustainable urban planning becomes evident when considering how to manage the changes in LULC to accommodate urban expansion, especially given that the world's population is expected to approach 10 bn people by the middle of the 21st century [34]. Understanding land-atmosphere interactions in depth is crucial, as evidenced by the complex relationship between land use and climate change. Because of their complexity, LULC changes must be efficiently monitored, predicted, and managed using advanced tools such as remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), and modelling methodologies [28, 33]. This body of research is essential in linking environmental science and policy-making to create pathways for achieving sustainable development goals. It contributes to promoting a mutually beneficial interaction between human communities and natural ecosystems even as we negotiate increasingly severe changes in the global environment. [9, 13, 24], providing us with new perspectives on creative approaches to socioeconomic development and ecological preservation, both of which are crucial for fostering peaceful cohabitation in a world undergoing fast change.

Urban planning, biodiversity, climate control, and human well-being are all impacted by changes in LULC, and these effects are complex and require careful analysis to be fully comprehended. Using a GIS-based analysis, Shah et al. [56] illustrate how LULC changes impact the values of urban ecosystem services in Chandigarh, India. This highlights the importance of incorporating the changes into urban planning to guarantee sustainable development. In a similar way, Shah et al. [56] argue for strategic land management to maintain biodiversity by highlighting the grave effects of LULC changes on ecosystem services and biodiversity. In order to improve climate resilience and mitigate the negative consequences of LULC changes, the importance of green infrastructure in urban development is highlighted [55]. Additionally, overviews by Pereira et al. [48] and Pugara et al. [49] provide insight into the ways in which LULC dynamics impact ecosystem services and climate management, highlighting the critical role LULC research plays in developing policies promoting both socioeconomic success and ecological preservation. The importance of LULC research in promoting a sustainable coexistence between human activity and natural ecosystems is highlighted by these observations taken as a whole.

A gap in the understanding of the complex connections between urban growth, environmental sustainability, and ecosystem services across fragmented landscapes has been brought to light by the study of LULC changes in Central Tanzania during the past 30 years. There is still an urgent need for a localized, in-depth analysis despite a large body of research demonstrating substantial global impact of LULC

changes caused by a confluence of natural phenomena and human activities on biodiversity, climatic patterns, soil health, water and air quality, and ecological balance as a whole. This is necessary because of the complex ways in which these changes impact the services provided by urban ecosystems and, consequently, the means of subsistence for people living in certain geographical and socioeconomic circumstances. The literature indicates that, in order to promote both socioeconomic growth and ecological preservation, there is widespread agreement on the significance of incorporating LULC dynamics into sustainable urban planning and policy-making. Nevertheless, there aren't many in-depth case studies that connect these alterations to the delivery of urban ecosystem services and their effect on local lives, particularly in developing countries like Tanzania. Previous research is important for frequently highlighting the necessity for strategic land management and the incorporation of green infrastructure into urban development plans, however it does not offer specific data or techniques for evaluating these effects locally. In addition, while acknowledged, the role the cutting-edge technologies like remote sensing and GIS play in tracking, forecasting, and managing LULC changes has not received enough attention in terms of how well they can be applied to the particular problems that Central Tanzania's fragmented landscapes face. This research attempts to close these gaps by providing a thorough analysis of LULC variations, their direct consequences on ecosystem services and local livelihoods, and identifying the main factors underlying these changes. The Manyoni District from 1993 to 2023 has been chosen as its object. A study with this level of focus is essential for developing evidence-based, targeted policies for sustainable development and for the larger conversation about striking a balance between human progress and the preservation of natural ecosystems in a world that is changing quickly.

The aim of the research has been to study LULC changes in the Manyoni District from 1993 to 2023 and their effects on urban ecosystem services and local livelihoods. This has required the fulfilling of the following objectives:

1. To evaluate the variations in LULC that emerged from 1993 to 2023;
2. To assess the impact of LULC on ecosystem and community livelihood in the study area;
3. To identify the primary driving factors for the changes within the study area.

Different studies [42, 63, 64] have focused on the changes in LULC in tropical and fragmented landscapes. Their findings and methods shed light on the intricate dynamics in these ecosystems. In order to record and analyze the changes in LULC, deforestation, urban growth, and agricultural methods, remote sensing and GIS have proven essential. In addition to using the cutting-edge instruments like NDVI to evaluate the dynamics of land cover and vegetation health, these studies also make use of field surveys and participatory techniques to gather firsthand information and comprehend socioeconomic factors. The studies highlight how these landscapes are significantly impacted by both natural and human-caused processes. For instance, as the study by Miringay et al. [42] points out, deforestation is mostly caused by logging and agricultural expansion, which results in habitat fragmentation and biodiversity loss. Increased urbanization, especially in peri-urban areas as another research by this team of scientists [41] shows, brings impermeable surfaces that interfere with soil permeability and water movement. Zella et al. [63] and Zhang et al. [64], on the other hand, highlight the adaptability and resilience of some ecosystems focusing on the regions of natural regeneration and regrowth. To lessen the negative ef-

fects of LULC changes, sustainable land management and conservation measures are desperately needed. In addition, combining LULC data with socioeconomic factors provides deeper understanding of the relationship between humans and the environment, which helps shape planning and policy for sustainable development. Together, the methods and results which are reported in the previous studies [42, 59, 64] highlight the significance of continuous observation and all-encompassing management strategies for preserving the ecological integrity and welfare of human populations relying on tropical and fragmented landscapes.

Ecosystem service theories have been developed to provide a thorough understanding of the various advantages that ecosystems offer human society, with an emphasis on urban environments. The idea, which can be generally divided into providing, regulating, sustaining, and cultural services, emphasizes the intrinsic importance of ecosystems in urban settings where human activity has dramatically changed the natural landscape [36]. The influence of changes in LULC on urban ecosystem services has been the subject of more research using these frameworks. For example, the studies have demonstrated that the loss of biodiversity, the reduction of carbon sequestration, and the elimination of green spaces due to urban growth all have an adverse effect on the quality of life and environmental sustainability in metropolitan areas [35, 61]. On the other hand, it has been shown that the incorporation of green infrastructure and strategic planning into urban landscapes improves ecosystem services, including air and water quality, urban biodiversity, and aesthetic and recreational advantages. In order to maintain and improve the well-being of urban populations, the studies emphasize how crucial it is to include ecosystem service considerations in decisions about land use and urban planning [8, 62].

Today, to monitor LULC, environmental studies and urban planning mostly rely on remote sensing technology. Because remote sensing provides timely, accurate, and wide spatial coverage of the Earth's surface, it makes tracking the dynamics of LULC changes conceivable [7]. Advanced methods such as LiDAR (Light Detection and Ranging), SAR (Synthetic Aperture Radar), and multispectral and hyperspectral imaging can provide comprehensive insights on vegetation cover, urban sprawl, and landscape fragmentation. Since remote sensing data has a temporal component that helps us understand the pattern and velocity of change, we are able to study LULC trends [27]. This capacity allows for the detection of deforestation, urbanization, and agricultural expansion, making it simpler to assess the impact of these changes on ecosystem services and biodiversity. Research using data from remote sensing has identified areas vulnerable to ecological deterioration, quantified the amount of agricultural land lost, and shown how urban areas are encroaching on natural ecosystems [38, 57]. With remote sensing technology providing a thorough awareness of changing landscapes, it is easier to create targeted therapies aimed at ecosystem conservation and restoration in the face of rapid LULC changes [5].

#### *Research Objects and Methods*

The research has been done in the Nkonko and Sasilo Wards located in the Manyoni District as one of the districts in the Singida Region [54].

The Nkonko and Sasilo Wards are situated in the Manyoni District's southern part (as shown in fig. 1), which is located at ( $-5^{\circ}27'-6^{\circ}92'$  S and  $34^{\circ}42'-35^{\circ}36'$  E). The Manyoni District has 3 distinct seasons: the cold dry (May–August), hot dry

(August–November), and rainy (November–April) [53, 54]. The Manyoni District experiences a uniform distribution of precipitation, with 49 rainy days on average and an average annual rainfall of 624 mm on the higher elevations, where the majority of thickets are found. Temperatures range from 19 °C in July to 24.4 °C in November [39]. The borders of the Manyoni District Council are shared by the following districts: the Ikungi District in the north-west; the Chemba District in the east; the Bahi District in the east; the Chamwino District in the south-east; the Iringa District in the south-west; and the Itigi Council in the west.

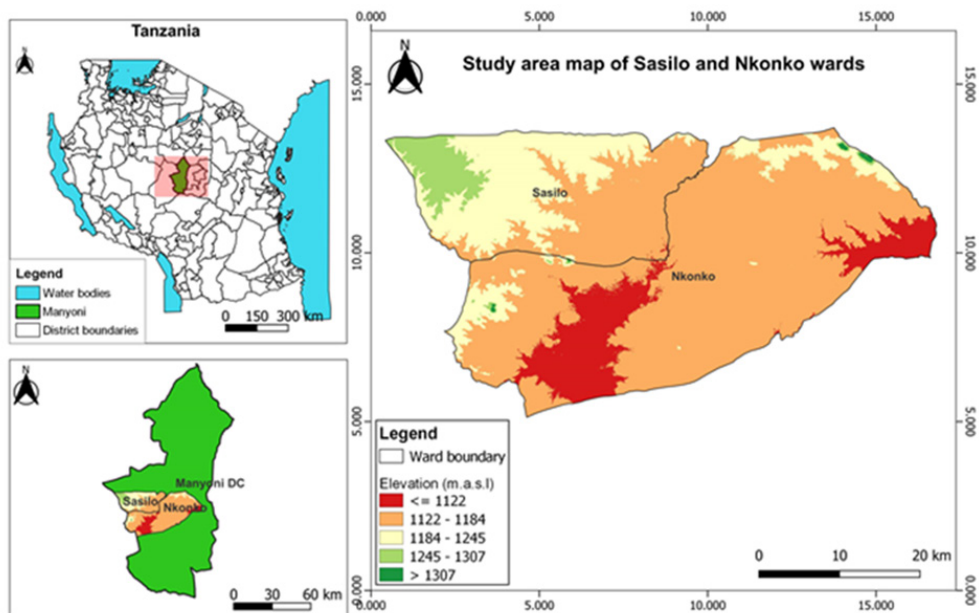


Fig. 1. The maps of the Sasilo and Nkonko Wards and their position in Tanzania

Over a 30-year period (1993, 2003, 2013, and 2023), the study has used a multimodal research methodology to examine how the changes in the land use have affected the livelihoods of those living in the Nkonko and Sasilo Wards. In addition to supervised classification algorithms and satellite imagery analysis, a combination of qualitative and quantitative methods have been used in this work. Using supervised classification approaches, patterns of land transformation have been identified by carefully tracking the temporal changes in land use within the designated periods through satellite pictures. Stakeholder meetings have been another way the research has entailed interacting with the community. Professional groups from the study region have attended these meetings, which have offered a forum for exchanging ideas about the potential impacts of changing land use on local livelihoods. A carefully planned and carried out household survey has been conducted in addition to these discussions with the aim of collecting information on the land ownership statuses and socio-economic characteristics. 353 households including men and women 25 years of age and older have been polled in total, providing a large dataset for further study. Focus group discussions (FGDs) have been conducted in order to get further insight into the subtleties of livelihood transitions and to corroborate the results of household surveys. A wide range of viewpoints has been ensured by the fact that the participants in these talks have not been the same as those who have taken part in the household surveys. The goal of the FGDs has been to investigate the different

aspects and changes in livelihood strategies, supporting the information from the survey. Meticulous data processing protocols have served as the foundation for this methodological approach. IBM SPSS 27 has been used to process the quantitative data obtained from the surveys. A comprehensive picture of the dynamic interaction between the changes in land use and livelihood adjustments throughout time has been provided by this combination of approaches, which has included direct community engagement through surveys and conversations and the study of satellite images.

### *Results and Discussion*

In this study, we have used Landsat images that have spanned a 30-year period from 1993 to 2023. The selected images have been represented by the geometrically corrected Level 1T (L1T) scenes, acquired from the Operational Land Imager (OLI) sensor, offering cloud-free operational land image data. Specifically, the images have been captured along Worldwide Reference System (WRS) path 169 and row 064, with a spatial resolution of 30 m accessed from the USGS Earth Explorer platform.

Multiple satellite images have been used in the study to capture LULC changes over time. Specifically, Landsat images from the years 1993 (Landsat 5), 2003 and 2013 (Landsat 7), and 2023 (Landsat 9) have been acquired (Fig. 2). Each image represents a different time point in the 30-year analysis period. These images have not been merged across years, but analyzed separately to compare LULC transitions between time intervals. The selection of images has prioritized those acquired during the dry season months (June to August) to ensure minimal cloud cover and consistency in vegetation phenology for accurate comparison. All the images have been Level 1T scenes, geometrically corrected, and accessed from the USGS Earth Explorer platform.

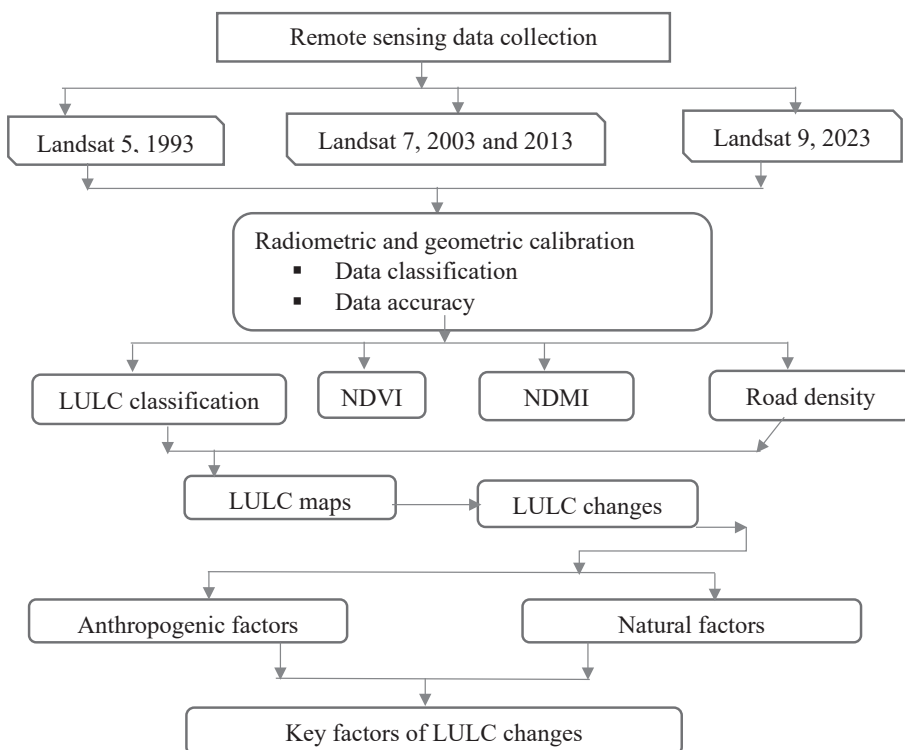


Fig. 2. The methodology and diagram structure framework of the study

We have analyzed the vegetation change cover where for accurate land cover analysis reflective of accurate land cover change, Landsat 5, 7, 8 and 9 image bands have been utilized, as recommended by Thonfeld et al. [60]. Prior to the Landsat image classification process, various preprocessing steps have been implemented to enhance imagery quality, as outlined by John and Ngondo et al. [21, 46]. Radiometric corrections have been applied using semi-automatic classification plugin of QGIS 3.28.2 to calibrate the data, eliminate atmospheric effects, and normalize the impact of light factors [10]. The classification of Landsat images has employed a supervised classification method known as Maximum Likelihood, conducted with ArcGIS 10.5 software. To validate the land cover classification, a 2-fold approach has been employed. The 1st step has been to do ground truthing during the 2023 field survey. This has involved utilizing GPS to find reference sites in different types of land cover, such as farmland, settlement, forest and barren land. These observations in the field have given us precise information for judging the 2023 categorization [43, 44]. Second, Google Earth's high-resolution satellite photos have been utilized to visually interpret land cover features and check the categorized outputs for years before 1993, 2003 and 2013. This made up for the lack of historical field data. [23, 60]. We have utilized these reference sources to build confusion matrices and figure out the usual accuracy measures.

The classification for 2023 has had an overall accuracy of 89.7 % and a Kappa coefficient of 0.85, which shows that the classified data and reference inputs have agreed with each other quite well. The fundamental attributes of the primary LULC categories employed in the current investigation are following: farmland – agricultural area, crop fields, fallow lands, vegetable lands; settlement – residential, commercial, industrial + other built-up areas; forest – deciduous forest, mixed forest, palms, conifers, shrubs, etc; barren land – land which has very limited or no trees/plants (modified from Rahman, Huq and Mukul, 2023 [51]).

The land cover classification accuracy has been validated using ground truth data and high-resolution Google Earth imagery. The overall classification accuracy for 2023 has been 89.7 %, with a Kappa coefficient of 0.85, indicating strong agreement between classified outputs and reference data. Similar accuracy levels have been achieved for other years.

To assess vegetation dynamics and monitor changes over time, the NDVI has been calculated using the spectral bands of red (*Rred*) and near-infrared (*Rnir*) of the Landsat 5, 7 and 8 in QGIS 3.34.4 using the following equation [20, 31]:

$$NDVI = \frac{Rnir - Rred}{Rnir + Rred}.$$

This approach provides a robust tool for vegetation dynamics analysis, assessment of environmental changes, and assistance with the management and preservation of natural resources by effectively distinguishing between vegetated and non-vegetated areas. Differentiating between vegetated and non-vegetated regions is within its analytical capabilities. Enhancing our awareness of environmental change, improving our knowledge of vegetation dynamics, and contributing to conservation strategies and natural resource management are all outcomes of this work.

*The Key Forest Products as Drivers of Income and Forest Management.* The regression study has looked at how different factors that lead to changes in forest cover affect the major source of income (Table 1). The parameter “Most important

forest products” has proved the only one to have major effect ( $B = 0.994$ ,  $p = 0.000$ ), which suggests that it is strongly linked to revenue. This implies that some forest products are particularly vital for people’s livelihoods. If forest cover goes down and makes them difficult to access, it might have a strong influence on income, but the fact that people depend on important forest products shows how important it is to manage forest resources in a way that is good for the environment.

Table 1

The regression coefficients affecting forest cover change

Model	Coefficient*			t	Sig.
	unstandardized		standardized		
	B	Std. Error	Beta		
Constant	0.032	0.034	–	0.938	0.349
Education level	–0.006	0.007	–0.004	–0.924	0.356
Sex of respondents	0.002	0.008	0.001	0.244	0.807
Reasons for decline	–0.003	0.003	–0.006	–1.210	0.227
Current availability status	–0.010	0.032	–0.002	–0.327	0.744
Firewood and charcoal	0.003	0.003	0.005	0.963	0.336
Most important forest products	0.994	0.005	0.996	215.478	0.000

\*Dependent variable: The main source of income.

*The Evaluation of Variations in LULC from 1993 to 2023.* Over the past 30 years, the study region has experienced considerable changes in land use and land cover, altering as much as 31.46 % of the region’s landscape, equivalent to 440.48 km<sup>2</sup> (Figs. 3, 4 and 5). These transformations are characterized by a 2.88 % increase in forest cover, adding up to 246.82 km<sup>2</sup>, alongside a 9.09 % growth in settlements, which expands the urban area by 222.76 km<sup>2</sup>. Additionally, barren lands have seen a 5.20 % rise, growing by 98.07 km<sup>2</sup>. Conversely, farmland has witnessed a significant reduction, decreasing by 17.17 % or 119.72 km<sup>2</sup> (Table 2). Collectively, these changes signal a dynamic evolution in the region’s landscape, marked by the decline in agricultural areas and expansion of both urban and forested zones.

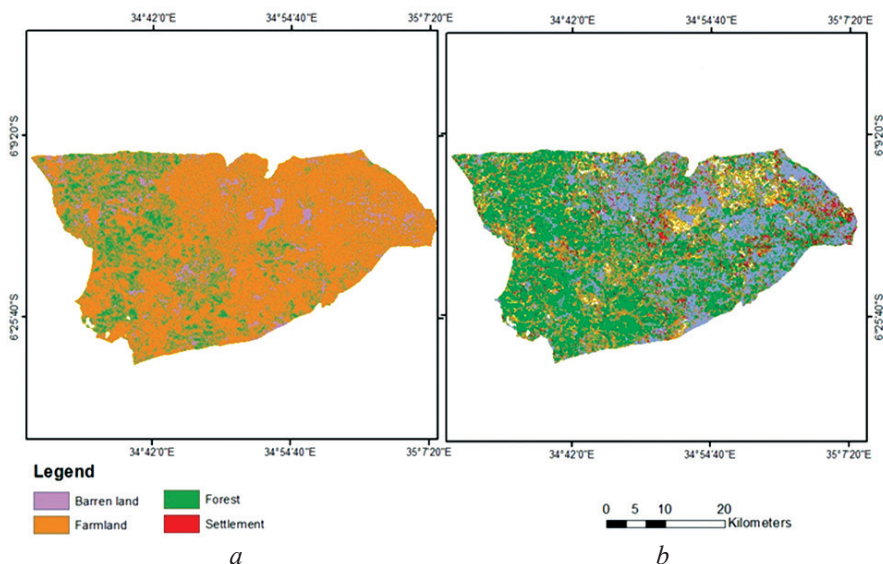


Fig. 3. The LULC change for the period from 1993 (a) to 2003 (b)

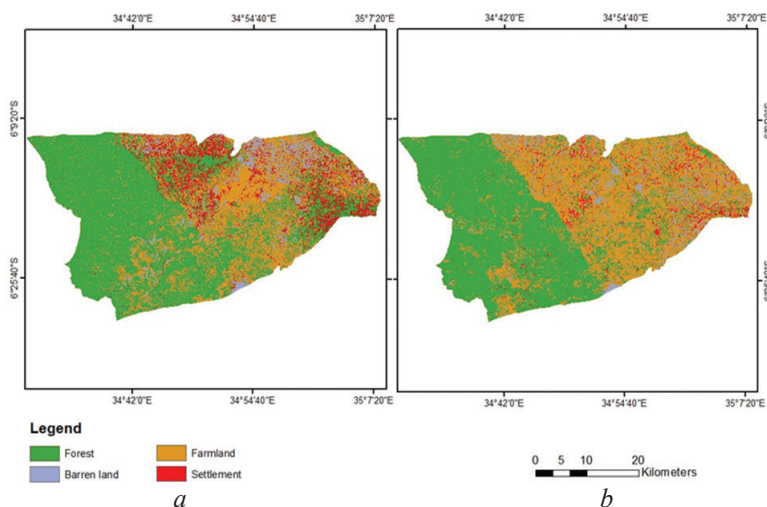


Fig. 4. The LULC change for the period from 2013 (a) to 2023 (b)

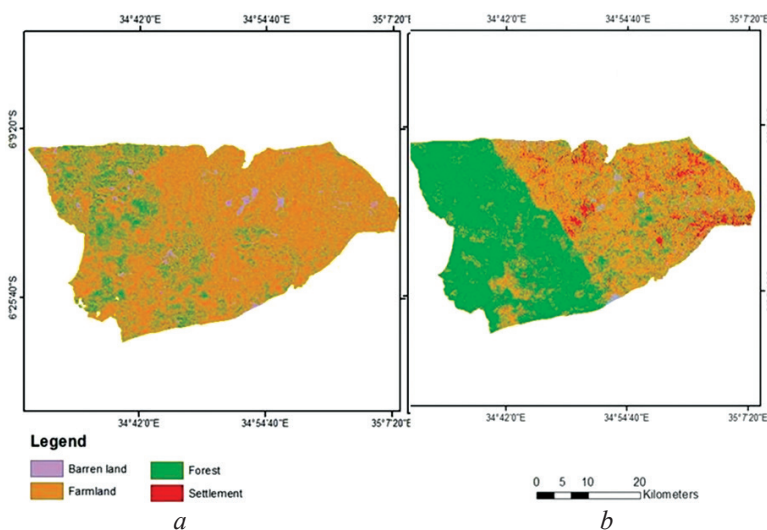


Fig. 5. The LULC change for the period from 1993 (a) to 2023 (b)

Table 2

**The changes in LULC from 1993 to 2023**

Land cover	1993, km <sup>2</sup>	2023, km <sup>2</sup>	$\Delta$ , km <sup>2</sup>	1993, %	2023, %	$\Delta$ , %
Forest	596.00	842.82	246.82	43.40	46.28	2.88
Barren land	10.14	108.21	98.07	0.74	5.94	5.20
Settlement	175.59	398.35	222.76	12.79	21.87	9.09
Farmland	591.41	471.69	-119.72	43.07	25.90	-17.17

*The Impact on Ecosystem and Community Livelihood.* Over the past 30 years, from 1993 to 2023, the NDVI has consistently and significantly increased, showing that the study area's vegetation health and density have significantly improved (Table 3). In addition to correlating well with the observed increase in forest cover in the area, the steady rise in NDVI values over the period indicates a strengthening of vegetation growth and biomass build-up. Areas with higher NDVI indicators appear to have had considerable gains in vegetation health and density, as indicated by the positive trend in NDVI values, which indicates a strong link. Consistent with

conservation initiatives and shifts in land use, this enhancement is more noticeable in vegetated regions. This research shows that changes in land cover have a direct impact on ecosystem health, as measured by NDVI.

Table 3

**The NDVI with Standard Deviation from 1993 to 2023**

Year	NDVI	Standard deviation
1993	0.28	0.14
2003	0.33	0.13
2013	0.38	0.12
2023	0.43	0.11

The mean and standard deviation of NDVI values in Table 4 and Fig. 6 have been calculated for each time period (1993, 2003, 2013, and 2023, respectively). The results have shown a consistent upward trend in vegetation health over the 30-year period. Specifically, in Table 4 the mean NDVI has increased from 0.28 in 1993 to 0.43 in 2023, indicating a significant improvement in vegetation density and greenness. The standard deviation has decreased slightly from 0.14 to 0.11, suggesting a more uniform vegetation distribution across the study area in recent years. These values support the observed forest cover expansion and reinforce the findings of improved ecosystem conditions due to conservation efforts and land management policies.

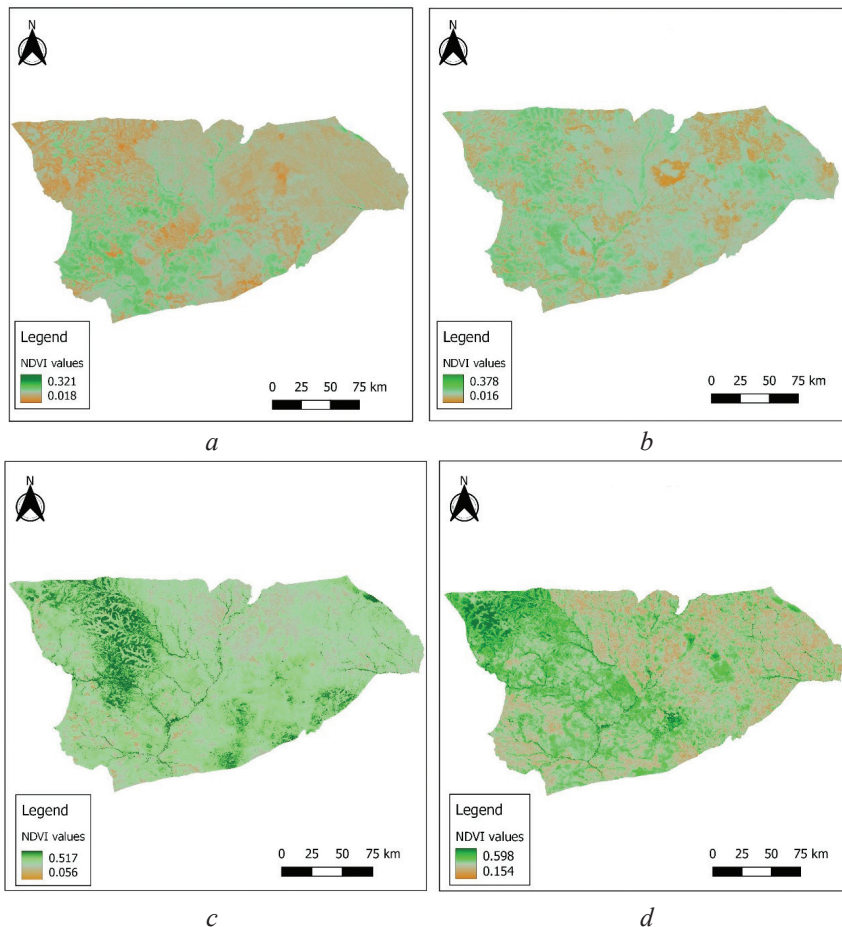


Fig. 6. The NDVI for the period from 1993 to 2023: *a* – 1993; *b* – 2003; *c* – 2013; *d* – 2023

Table 4

The percentage of land area by the NDVI class (1993–2023)

NDVI range	Vegetation Status	1993, %	2003, %	2013, %	2023, %
<0.1	Non-vegetated/Bare	18.2	13.5	10.9	8.1
0.1–0.3	Sparse	34.6	31.2	26.7	18.7
0.3–0.5	Moderate	30.1	34.8	38.4	43.0
>0.5	Dense	17.1	20.5	24.0	30.2

The analysis of the NDVI from 1993 to 2023 exposes a substantial improvement in vegetation cover across the study area of the Sasilo and Nkonko Wards in the Manyoni District (Fig. 7). The proportion of land with dense vegetation (NDVI > 0.5) has increased from 17.1 % in 1993 to 30.2 % in 2023, while the areas with sparse or no vegetation (NDVI < 0.3) has decreased from 52.8 to 26.8 %. These results confirm that vegetation recovery is not limited to isolated pixels but represents a widespread ecological improvement, reflecting the impact of conservation efforts and changing land use practices over 30 years.

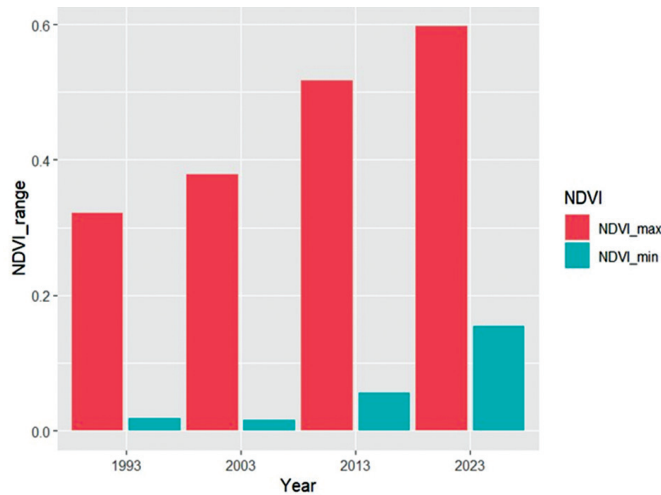


Fig. 7. The NDVI minimum and maximum values graph

The benefit of the NDVI chart is that it provides a clear temporal trend of vegetation change across the entire study area, complementing the spatial insights from the maps. To address the concern about isolated high values, we have included the percentage distribution of NDVI ranges, which more accurately reflects broad-scale vegetation improvement rather than relying on extreme pixel values.

*The Primary Driving Factors for LULC Changes.* The changes in LULC observed in the area over the past 30 years can be attributed to a complex mixture of contributing factors. Notably, conservation policies enacted after 2003 aimed at protecting community forests near the Rungwa-Kizigo-Muhesi Game Reserves have significantly influenced the rejuvenation of forest cover, highlighting the critical role of legislative frameworks in land use management and conservation efforts. Concurrently, the growth of settlements driven by population expansion and the desire for new sources of income has put greater demands for land resources, resulting mostly in the conversion of farmland into settlement areas, while protected forested areas have been recovering and expanding.

Settlement expansion has primarily transformed farmland, while protected forest areas have been experiencing recovery due to conservation policies. This resolves the earlier contradiction and distinguishes between the areas of pressure and regeneration.

Additionally, agricultural practices have adapted to the shifting availability of arable land, with the changes in land use patterns emerging from both settlement expansion and conservation measures. The temporary halt in the decrease of farmland areas observed in 2013 and 2023 illustrates the community's adaptive strategies to overcome the challenges posed by restricted land availability.

*Forest Products Status in the Study Area.* The residents of the Nkonko and Sasilo Wards are obviously significantly dependent on forest products for a variety of needs connected to their livelihood, as seen by the staggering 98 % of community members using these resources (Table 5). The tiny minority of 2 % who do not use forest resources contrasts sharply with the large majority, signifying unusual circumstances or non-normative preferences. The primary usage of firewood and charcoal by over half of the respondents (51.3 %) highlights the vital role that these resources play in providing families with the energy they need on a daily basis. There is a need for improvement in community education and awareness of sustainable forest utilization, as evidenced by the acknowledgement of non-timber forest products (NTFPs) and the slight uncertainty (2.3 %). A few more forest products that demonstrate the diverse range of uses for forest resources are grass for livestock (12.3 %), timber and bamboo (13.9 %), and honey (11.3 %).

Table 5

**The forest products status in the study area**

Variables	Items	Frequency, N	Relative frequency, %	Cumulative frequency, %
Constant use of forest products	Yes	346	98.0	98.0
	No	7	2.0	100
Forest products, which are the most important	Firewood and charcoal	181	51.3	51.3
	Grass for livestock	44	12.3	63.6
	Timber and bamboo	49	13.9	77.5
	Honey	40	11.3	88.8
	Other NTFPs	31	8.2	97.0
	Do not know	8	2.3	100
NTFPs availability status	Declined	345	97.7	97.7
	Increased	0	0	97.7
	Do not know	8	2.3	100
Reasons for increase or decline	Agriculture	196	55.5	55.5
	Charcoal burning	78	22.1	77.6
	Bush burning	43	12.2	89.8
	Timber harvesting	32	9.1	98.9
	Do not know	4	1.1	100

Significant changes in LULC over the last 30 years, primarily due to conservation initiatives, population shifts, and changes in agricultural methods, are intersected with this deep community engagement with forest resources. Land use patterns have been permanently altered by the 1990s extension of the Rungwa-Kizigo-Muhesi

Game Reserves, which has forced the migration of communities that had previously been involved in agriculture inside these boundaries. This expansion has acted as a contributing factor to the observed decline in farmland areas and demonstrated the importance of conservation and legislative initiatives in influencing land use patterns. The community's adaptive methods in response to shifting land availability and conservation policies are further reflected in the modifications made to agricultural practices and the rise of settlements, which are driven by population increase and the pursuit for new chances for livelihood. A complex interaction between conservation efforts, land use management, and community livelihoods is highlighted by these developments as well as the community's reliance on forest products. This emphasizes the need for well-balanced approaches that support both ecological sustainability and human well-being.

A regression investigation has shown that the variable "Most important forest products" is the only one that significantly predicts income ( $B = 0.994$ ,  $p < .001$ ). This shows that people depend on crucial forest products for their livelihoods. This is similar to what happened in Liberia, where activities related to forest products have raised household income by up to 167 % for non-timber items [1, 2]. A research from Malawi has also shown that reliance goes beyond money and includes time and access issues [45]. When the forest cover declines, it becomes much harder for people to get crucial materials, as it one way or another can directly affect various sources of income. This shows the importance of long-term sustainable forest management plan for environment and people who depend much on these forests.

There have been noticeable changes to the study area's geography over the past 30 years, with more urban areas and forests appearing, less farmland disappearing, and more desolate terrain spreading out. Because of urbanization, changes in agriculture, and conservation efforts, land use is changing all throughout the world, and these movements reflect that. The significance of satellite imagery in monitoring environmental changes is underscored by the fact that the increase in forest cover, as confirmed by López-Amoedo et al. [32], may indicate the success of afforestation and reforestation initiatives or even natural regrowth [52]. At the same time, the larger tendencies of urbanization, as those seen in Jodhpur city, where the social, economic, and ecological effects of growing cities are being observed, are consistent with the 9 % growth in urban settlements [19]. This demonstrates the increasing urbanization of the research area and highlights the need for environmentally responsible approaches to city planning.

There is an urgent need for more sophisticated methods such as object-based image analysis (OBIA), multi-temporal change detection techniques, LiDAR, high-resolution satellite data, and machine learning-based classification for detecting changes in LULC if we are to solve the mystery of the increasing number of desolate landscapes, which may be the result of overexploitation or the negative impact of climate on soil quality. Simultaneously, the decrease in farmlands is in line with predictions made for Dongying City, China, which shows that agricultural land is being replaced by urban one according to the results of predictive modelling. This tendency is also mirrored in the research area [65]. Furthermore, studies that utilize Normalized Difference Built-up Index (NDBI) to forecast changes in LULC raise concerns about the growing demands for natural ecosystems, as evidenced by the shrinkage of naturally vegetated lands [26]. NDBI is an index used to detect built-up or urbanized areas [25]. Incorporating findings from the current research to situate the conversation within Tanzania framework of land use dynamics, these findings emphasize

the need for careful oversight and control of land cover changes to prevent detrimental environmental effects.

The strong rise in NDVI values from 1993 to 2023 in the study area is consistent with the current scientific findings and highlights the impact of conservation efforts and careful land management on plant dynamics. This increase indicates better plant health and density. According to dos Santos et al. [14], who has examined the NDVI and its use in human health research, this upward tendency reflects the multidisciplinary nature of NDVI, which expands its utility beyond ecological studies to human health consequences. Simultaneously, changes in NDVI estimation methods, like the ones described by A.L.P. De Ocampo [12], using NDVI estimation based on filter augmented imaging, corroborate our findings, confirming that technological advancement is crucial for improving the accuracy of vegetation monitoring. The research by de la Iglesia Martinez et al. [11] and other studies on policy interventions allude to the use of NDVI in urban greening policies, which supports our findings on its positive effects on ecosystems. Consistent with the encouraging trends in vegetation that have been found, these references show that NDVI is valuable in many ecological, technological, and socioeconomic contexts, and that it plays an essential role in fostering environmental sustainability and urban well-being.

LULC changes in the study area over the past 30 years reflect broader worldwide trends found in present research. These changes have been determined by the dynamic interplay of conservation policies, settlement growth, and agricultural adaptations. These findings are in line with the ones by Gaur et al. [18] insisting on the significance of policy in sustainable land management, as the legislative frameworks passed after 2003 to save community forests close to Game Reserves, have been crucial in enabling the restoration of forest cover. The ecological consequences brought up by Anthony et al. [3] are echoed by the pressures caused by population development and settlement expansion, which result in the conversion of agriculture and forested areas for human consumption. This case study, together with the technological developments in monitoring LULC changes that Karandikar et al. [22] analyze, highlights the precarious equilibrium between protecting natural ecosystems and allowing for human population growth. Through the temporary stabilization of farmland areas, the community has been able to adapt to the changing availability of arable land, which mirrors the hydrological and environmental impacts on LULC dynamics studied by Lazorca (Andrei) et al. and Mekonnen et al. [30, 40]. These studies shed light on the many facets of LULC changes and show how important it is to have policies that drive comprehensive solutions combining human socioeconomic requirements with ecological sustainability.

Based on their almost universal use (98 %) and dependence on forest products, people living in the Nkonko and Sasilo Wards share views found in the current research on sustainable forest utilization. The studies by E.R. Eslit [16] and M. Qanitha et al. [50] shed light on the complex interplay between livelihoods and forest conservation. These researches support integrated strategies that, by using sustainable practices, not only improve community welfare but also protect ecosystems. These references emphasize conservation partnerships, the application of sustainable livelihood frameworks, and the influence of community narratives in designing conservation strategies all of which are pertinent to the needs and reality of the Nkonko and Sasilo Wards. The recognition of NTFPs and the wide range of uses of forest products, particularly the heavy reliance on firewood and charcoal, highlight the need for

integrated forest management approaches. In order to guarantee that communities' means of subsistence are sustainable and compatible with conservation efforts, these tactics ought to involve and instruct local populations to follow the best sustainable forest management practices.

The comparison demonstrates a general agreement regarding the crucial equilibrium between utilizing forest resources for community sustenance and applying sustainable methods to guarantee long-term ecological and economic well-being.

A complicated situation that is consistent with findings in current academic literature is presented by the large changes in LULC. This has been seen over the previous 30 years due to conservation programs, demographic shifts, and agricultural revolutions. The 1990s development of the Rungwa-Kizigo-Muhesi Game Reserves, which has forced agricultural villages to migrate and resulted in a reduction of arable areas, highlights the significant influence of conservation and legal measures on patterns of land use. The complex link between conservation efforts, land use management, and community livelihoods that is highlighted in the studies [6, 29], is reflected in this scenario. The study clarifies how forest conservation efforts might change the use of agricultural land, requiring impacted communities to find alternate means of subsistence. Longitudinal studies like the one by Nigussie et al. [47] show how conservation policies change land use over time. These changes affect not just the physical landscapes but also the ways communities adapt. Also studies like the one by Masayi et al. [37] show how these kinds of changes directly influence the livelihoods of households. This shows how important it is to make sure that conservation efforts are in line with regionally feasible and sustainable ways to make a living.

The state of the Rungwa-Kizigo-Muhesi Game Reserves and the aggregate results from these studies highlight the urgent need for balanced approaches to land use planning and conservation that take into account both ecological sustainability and the welfare of local residents. In the face of shifting land use and conservation landscapes, they support laws and procedures that guarantee ecological preservation while also enabling communities to develop adaptable livelihood alternatives. Achieving long-term ecological integrity and socioeconomic stability requires this dual approach.

### *Conclusion*

The landscape of the area under study has undergone major changes over the past 30 years, as evidenced by a thorough examination of changes in LULC. Notably, there has been a considerable expansion of urban settlements and forest cover, combined with a notable drop in cropland. These alterations highlight how dynamically population expansion, agricultural adaptations, and conservation initiatives interact within the research region. The expansion of settlements brought about by demographic changes and the rise in forest cover, which is attributable to conservation measures implemented close to the Rungwa-Kizigo-Muhesi Game Reserves, serve as an example of the many variables influencing LULC changes. The group's heavy reliance on forest resources for subsistence, together with the noted LULC changes, emphasizes how closely land management strategies, conservation initiatives, and community livelihoods are intertwined. This study clarifies not just how the environment is changing but also how important it is to implement sustainable management practices that balance environmental preservation with human welfare.

Policymakers and urban planners must devise and put into action plans that improve urban ecosystem services while meeting the increasing needs of urbanization in the light of the findings. In order to fully comprehend the effects of LULC changes, future studies should concentrate on the in-depth evaluation of particular ecosystem services, such as carbon sequestration and biodiversity protection. Innovative remote imaging technologies and GIS may also make it easier to track the health of ecosystems over time and give us a better understanding of how LULC changes over space. Policymakers should consider including community-based conservation programs that leverage regional knowledge and traditions in order to guarantee the sustainable use of forest resources. Urban planning frameworks should prioritize the protection of green spaces and stimulate the rehabilitation of damaged lands in order to maintain ecological balance and enhance the quality of life for urban inhabitants.

## REFERENCES

1. Amadu F.O., Miller D.C. Food Security Effects of Forest Sector Participation in Rural Liberia. *Food Security*, 2024, vol. 16, pp. 1099–1124. <https://doi.org/10.1007/s12571-024-01468-7>
2. Amadu F.O., Miller D.C. The Impact of Forest Product Collection and Processing on Household Income in Rural Liberia. *Forest Policy and Economics*, 2024, vol. 158(C), art. no. 103098. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103098>
3. Anthony T., Shaban N., Nahonyo C. Land Cover Change as a Proxy of Changes in Wildlife Distribution and Abundance in Tarangire-Simanjiro-Lolkisale-Mto wa Mbu Ecosystem. *Tanzania Journal of Science*, 2023, vol. 49, no. 1, pp. 196–206. <https://doi.org/10.4314/tjs.v49i1.17>
4. Azizi P., Soltani A., Bagheri F., Sharifi S., Mikaeli M. An Integrated Modelling Approach to Urban Growth and Land Use/Cover Change. *Land*, 2022, vol. 11, no. 10, art. no. 1715. <https://doi.org/10.3390/land11101715>
5. Babaremu K., Taiwo O., Ajayi D. Impacts of Land Use and Land Cover Changes on Hydrological Response. *TWIST*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 256–267.
6. Banadzem T. J.-L., Ambukwa G.A. Forest-Culture Relationship in NSO and Mbiame Fondoms: Case of the Montane Forests of Ngongbaa, Kovifem and Kovkinkar, North West Cameroon. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2022, vol. 7, iss. 1, pp. 919–935. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6291303>
7. Beroho M., Briak H., Cherif E.K., Boulahfa I., Ouallali A., Mrabet R., Kebede F., Bernardino A., Aboumaria K. Future Scenarios of Land Use/Land Cover (LULC) Based on a CA-Markov Simulation Model: Case of a Mediterranean Watershed in Morocco. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 4, art. no. 1162.
8. Bindajam A.A., Mallick J., Talukdar S., Islam A.R.Md.T., Alqadhi S. Integration of Artificial Intelligence-Based LULC Mapping and Prediction for Estimating Ecosystem Services for Urban Sustainability: Past to Future Perspective. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, art. no. 1887. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08251-4>
9. Cobbinah P.B. Urban Resilience in Climate Change Hotspot. *Land Use Policy*, 2021, vol. 100, art. no. 104948. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104948>
10. Dasgupta S., Lall S., Wheeler D. Spatiotemporal Analysis of Traffic Congestion, Air Pollution, and Exposure Vulnerability in Tanzania. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 778, art. no. 147114.
11. De la Iglesia Martinez A., Labib S.M. Demystifying Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for Greenness Exposure Assessments and Policy Interventions in Urban Greening. *Environmental Research*, 2023, vol. 220, art. no. 115155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115155>

12. De Ocampo A.L.P. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Estimation based on Filter Augmented Imaging. *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. Thailand, Krabi, 2023, pp. 84–88. <https://doi.org/10.1109/iEECON56657.2023.10126616>
13. Debangshi U., Ghosh P., Tiwari H., Maurya D.K., Kumar M. Urban Resiliency towards Climate Change. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2022, vol. 12, no. 11, pp. 2037–2055. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2022/v12i1131194>
14. Dos Santos J.d.B.G., de Souza Hacon S., Alves da Silva Neves S.M. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Seu Uso no Estudo da Saúde Humana: Uma Revisão de Escopo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 1115–1144. (In Port.). <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1115-1144>
15. Enoh M.A., Njoku R.E., Okeke U.C. Modeling and Mapping the Spatial–Temporal Changes in Land Use and Land Cover in Lagos: A Dynamics for Building a Sustainable Urban City. *Advances in Space Research*, 2023, vol. 72, iss. 3, pp. 694–710. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.042>
16. Eslit E.R. Whispers of the Woodlands: Unveiling the Interplay of Forest Conservation and Livelihood through Community Narratives. *Preprints*, 2023. 15 p. <https://doi.org/10.20944/preprints202306.1207.v1>
17. Fahad S., Li W., Valjarević A., Kavroudakis D., Sharifi A. The Impact of Rapid Urban Growth on Land Use and Land Cover Change and Urban Heat Island: The Case of Babuzai, Pakistan. *Research Square*, 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2828285/v1>
18. Gaur S., Singh R. A Comprehensive Review on Land Use/Land Cover (LULC) Change Modeling for Urban Development: Current Status and Future Prospects. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 2, art. no. 903. <https://doi.org/10.3390/su15020903>
19. Gupta N., Mathew A., Khandelwal S. Spatio-Temporal Impact Assessment of Land Use/Land Cover (LU-LC) Change on Land Surface Temperatures over Jaipur City in India. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 283–299. <https://doi.org/10.1080/19463138.2020.1727908>
20. Huang W., Huang J., Wang X., Wang F., Shi J. Comparability of Red/Near-Infrared Reflectance and NDVI Based on the Spectral Response Function between MODIS and 30 Other Satellite Sensors Using Rice Canopy Spectra. *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 12, pp. 16023–16050. <https://doi.org/10.3390/s131216023>
21. John E.M. *A Forest Monitoring System for Tanzania: Mapping Change and Extent*. Thesis. Aberystwyth University, 2023. 373 p.
22. Karandikar A.M., Agrawal A.J., Welekar R.R. Decadal Forest Cover Change Analysis of the Tropical Forest of Tadoba-Andhari, India. *Signal, Image and Video Processing*, 2023, vol. 18, pp. 1705–1714. <https://doi.org/10.1007/s11760-023-02872-w>
23. Kija H.K., Ogutu J.O., Mangewa L.J., Bukombe J., Verones F., Graae B.J., Kideghesho J.R., Said M.Y., Nzunda E.F. Land Use and Land Cover Change within and around the Greater Serengeti Ecosystem, Tanzania. *American Journal of Remote Sensing*, 2020, vol. 8, iss. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20200801.11>
24. Klimas E. Sustainable Development and Urban Planning Regulations in the Context of Climate Change Management Measures. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 24–37. [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.8.1\(2\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.8.1(2))
25. Kshetri T.B. NDVI, NDBI and NDWI Calculation Using Landsat 7 and 8. *Geo-World*, 2018, vol. 2, pp. 32–34.
26. Kulkarni K., Vijaya P.A. NDBI Based Prediction of Land Use Land Cover Change. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, vol. 49, pp. 2523–2537. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01411-9>
27. Kuma H.G., Feyessa F.F., Demissie T.A. Assessing the Impacts of Land Use/Land Cover Changes on Hydrological Processes in Southern Ethiopia: The SWAT Model Approach. *Cogent Engineering*, 2023, vol. 10, no. 1, art. no. 2199508. <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2199508>

28. Lachir A. Climate Integration in Sustainable Urban Planning. *Addressing Environmental Challenges through Spatial Planning*. IGI Global Publ., 2022, pp. 152–173. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8331-9.ch008>
29. Lambi C.M. *International Journal of Resource and Environmental Management*, 2021, vol. 6, no. 2.
30. Lazurca (Andrei) L.G., Mihăilă D., Ionel Bistricean P., Dănuț Horodnic V. Air Quality Assessment for Suceava County, Romania. *EGU23, the 25th EGU General Assembly*, 2023, art. no. EGU23-397. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-397>
31. Lim J., Watanabe N., Yoshitoshi R., Kawamura K. Simple In-Field Evaluation of Moisture Content in Curing Forage Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Grassland Science*, 2020, vol. 66, iss. 4, pp. 238–248.
32. López-Amoedo A., Álvarez X., Lorenzo H., Rodriguez J.L. Multi-Temporal Sentinel-2 Data Analysis for Smallholding Forest Cut Control. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 15, art. no. 2983. <https://doi.org/10.3390/rs13152983>
33. Luthra A. Climate Change and Sustainable Urban Transport Environment. *Climate Change and Urban Environment Sustainability*. Springer Singapore, 2023, pp. 31–45. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6_3)
34. MacDonald G. Climate, Capital, Conflict: Geographies of Success or Failure in the Twenty-First Century. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, vol. 110, no. 6, pp. 2011–2031. <https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1800300>
35. Maruf J.K., Ara S. Examining the Ecosystem Service Values due to LULC Changes: A Case Study on Cox's Bazar, Bangladesh. *Khulna University Studies*, 2022, p. 443–457. <https://doi.org/10.53808/KUS.2022.ICSTEM4IR.0079-se>
36. Maruf J.K., Ara S. Examining the Spatio-Temporal Changes of Ecosystem Service Value Due to LULC Changes: A Case Study on Cox's Bazar, Bangladesh. *Research Square*, 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2500133/v1>
37. Masayi N., Tsingalia M., Omondi P. Land Use Changes and Impacts on Livelihoods of the Communities Adjacent to Mt Elgon Forest Ecosystem. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2020, vol. 24, no. 7, pp. 1–12. <https://doi.org/10.9734/JGEESI/2020/v24i730239>
38. Masolele R.N. Mapping the Diversity of Land Uses Following Deforestation across Africa. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. no. 1681.
39. Mbwambo E.P., Kabote S.J., Kazuzuru B. Impact of Climate Variability and Change Adaptation Strategies on Technical Efficiency of Sorghum Production in Manyoni District, Tanzania. *Tanzania Journal of Agricultural Sciences*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 153–168.
40. Mekonnen Y.A., Manderso T.M. Land Use/Land Cover Change Impact on Streamflow Using Arc-SWAT Model, in Case of Fetam Watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 2023, vol. 13, art. no. 111. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01914-5>
41. Miringay G.J., Burra M.M., Babere N.J. The Administrative Transformation of the Urban Authority and the Emerging Quarantined Rural Satellite Towns (ERSTs) in Urban Authorities. The Case of Dodoma National Capital City, Tanzania. *International Journal of Social Science Research and Review*, 2022, vol. 5, no. 11, pp. 180–192. <https://doi.org/10.47814/ijssrr.v5i11.721>
42. Miringay G.J., Burra M.M., Babere N.J. The Administrative Transformation of the Agrarian Urban Authority and the Emergence of Urban Village in Urban Settings. *African Journal of Land Policy and Geospatial Sciences*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 107–128. <https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v6i1.32450>
43. Mosha D., Kakolwa M.A., Mahende M.K., Masanja H., Abdulla S., Drakeley C., Gosling R., Wamoyi J. Safety Monitoring Experience of Single-Low Dose Primaquine Co-Administered with Artemether–Lumefantrine among Providers and Patients in Routine Healthcare Practice: a Qualitative Study in Eastern Tanzania. *Malaria Journal*, 2021, vol. 20, art. no. 392. <https://doi.org/10.1186/s12936-021-03921-w>

44. Mugo R., Waswa R., Nyaga J.W., Ndubi A., Adams A.C., Flores-Anderson A.I. Quantifying Land Use Land Cover Changes in the Lake Victoria Basin Using Satellite Remote Sensing: The Trends and Drivers between 1985 and 2014. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 17, art. no. 2829. <https://doi.org/10.3390/rs12172829>

45. Nerfa L., Rhemtulla J.M., Zerriffi H. Forest Dependence is More than Forest Income: Development of a New Index of Forest Product Collection and Livelihood Resources. *World Development*, 2020, vol. 125, art. no. 104689. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104689>

46. Ngondo J., Mango J., Liu R., Nobert J., Dubi A., Cheng H. Land-Use and Land-Cover (LULC) Change Detection and the Implications for Coastal Water Resource Management in the Wami–Ruvu Basin, Tanzania. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 8, art. no. 4092.

47. Nigussie G., Fekadu M., Demissew S., Warkineh B. Impact of Conservation Management on Land Change: a Case Study in Guassa Community Conservation Area for the Last 31 Years (1986–2015). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, vol. 5, pp. 1495–1504. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00650-7>

48. Pereira P., Inacio M., Kalinuskas M., Bogdzevič K., Bogunovic I., Zhao W. Land-Use Change Impacts on Ecosystem Services: An Overview. *EGU General Assembly 2022*, 2022, art. no. EGU22-6301. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-63-1>

49. Pugara A., Pradana B., Priambudi B.N. The Impact of the Land Use Changes through Batang Spatial Planning on the Ecosystem Services on Climate Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1082, art. no. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1082/1/012022>

50. Qanitha M., Hardjanto H., Sundawati L. Strategy on Sustainable Livelihood Community after Implementation Conservation Partnership in National Parks Bantimurung-Bulusaraung. *Media Konservasi*, 2023, vol. 28, no. 1, pp. 77–83. <https://doi.org/10.29244/medkon.28.1.77-83>

51. Rahman Md.M., Huq H., Mukul S.A. Implications of Changing Urban Land Use on the Livelihoods of Local People in Northwestern Bangladesh. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 15, art. no. 11769. <https://doi.org/10.3390/su151511769>

52. Rynkiewicz A., Hoscilo A., Chmielewska M., Lewandowska A., Aune-Lundberg L., Nilsen A. Detection of Land Cover Changes Based on the Sentinel-2 Multitemporal Data on the GEE Platform. *EGU23, the 25th EGU General Assembly*, 2023, art. no. EGU23-17586. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17586>

53. Sagali H.L., Yingli H. Barriers to Equity: Investigating Community Challenges in Accessing and Benefiting from Forest Resources in Manyoni, Tanzania. *International Forestry Review*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 234–247. <https://doi.org/10.1505/146554824838819914>

54. Sagali H.L., Yingli H., Mendako R.K. Assessing the Economic Significance of Forest Income in Community Livelihoods in Manyoni District, Tanzania. *International Forestry Review*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 248–259. <https://doi.org/10.1505/146554824838819888>

55. Semeraro T. Impact Assessment of Green Infrastructure in Urban Planning. *Current Advances in Geography, Environment and Earth Sciences*, 2022, vol. 9, pp. 82–94. <https://doi.org/10.9734/bpi/cagees/v9/4118E>

56. Shah M.I., Abbas S., Olohunlana A.O., Sinha A. The Impacts of Land Use Change on Biodiversity and Ecosystem Services: An Empirical Investigation from Highly Fragile Countries. *Sustainable Development*, 2023, vol. 31, iss. 3, pp. 1384–1400. <https://doi.org/10.1002/sd.2454>

57. Simon O., Lyimo J., Gwambene B., Yamungu N. Unveiling the Transforming Landscape: Exploring Patterns and Drivers of Land Use/Land Cover Change in Dar es Salaam Metropolitan City, Tanzania. *African Geographical Review*, 2024, vol. 43, no. 2, pp. 875–891. <https://doi.org/10.1080/19376812.2024.2309405>

58. Singh B., Venkatramanan V., Deshmukh B. Monitoring of Land Use Land Cover Dynamics and Prediction of Urban Growth Using Land Change Modeler in Delhi and its

Environ, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, pp. 71534–71554. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20900-z>

59. Sumari N.S., Xu G., Ujoh F., Korah P.I., Ebohon O.J., Lyimo N.N. A Geospatial Approach to Sustainable Urban Planning: Lessons for Morogoro Municipal Council, Tanzania. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 22, art. no. 6508. <https://doi.org/10.3390/su11226508>

60. Thonfeld F., Steinbach S., Muro J., Kirimi F. Long-Term Land Use/Land Cover Change Assessment of the Kilombero Catchment in Tanzania Using Random Forest Classification and Robust Change Vector Analysis. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 7, art. no. 1057. <https://doi.org/10.3390/rs12071057>

61. Vatitsi K., Ioannidu N., Mirli A., Siachalou S., Kagalou I., Latinopoulo D., Malinis G. LULC Change Effects on Environmental Quality and Ecosystem Services Using EO Data in Two Rural River Basins in Thrace, Greece. *Land*, 2023, vol. 12, no. 6, art. no. 1140. <https://doi.org/10.3390/land12061140>

62. Wang R., Xu X., Bai Y., Alatalo J.M., Yang Z., Yang W., Yang Z. Impacts of Urban Land Use Changes on Ecosystem Services in Dianchi Lake Basin, China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 9, art. no. 4813. <https://doi.org/10.3390/su13094813>

63. Zella A.Y., Kitali L.J., Lusiru S.N., Malekela A.A., Msambichaka S., Nassor Z., Ntature E. Adapting Innovation of Information and Communication Technologies to Climate Change Risks for Agriculture Sustainability in Central Tanzania. *World Journal of Advanced Science and Technology*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 52–66. <https://doi.org/10.53346/wjast.2023.3.1.0057>

64. Zhang J., Chen S.S., Gao Q., Shen Q., Kimirei I.A., Mapunda D.W. Morphological Characteristics of Informal Settlements and Strategic Suggestions for Urban Sustainable Development in Tanzania: Dar es Salaam, Mwanza, and Kigoma. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 9, art. no. 3807. <https://doi.org/10.3390/su12093807>

65. Zhao X., Wang P., Gao S., Yasir M., Islam Q.U. Combining LSTM and PLUS Models to Predict Future Urban Land Use and Land Cover Change: A Case in Dongying City, China. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 9, art. no. 2370. <https://doi.org/10.3390/rs15092370>

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

Научная статья

УДК 630.228.7:630.552

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-30-49

## Оценка состояния лесных культур при лесоустройстве

*Л.В. Черных, канд. с.-х. наук;* ResearcherID: [LFT-7246-2024](https://orcid.org/0000-0003-3428-0701),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3428-0701>

*Д.В. Черных, канд. с.-х. наук;* ResearcherID: [KIJ-1310-2024](https://orcid.org/0009-0000-7004-8374),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7004-8374>

*В.Л. Черных<sup>✉</sup>, д-р с.-х. наук, проф.;* ResearcherID: [AAL-3874-2020](https://orcid.org/0000-0002-9321-5128),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9321-5128>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; ChernyhLV@volgatech.net, ChernyhDV@volgatech.net, ChernyhVL@volgatech.net<sup>✉</sup>

---

Поступила в редакцию 19.11.24 / Одобрена после рецензирования 15.02.25 / Принята к печати 17.02.25

---

**Аннотация.** Крайне важной для принятия решений органами государственной власти в части сохранения лесов является информация о лесоустройстве. Объективная характеристика состояния искусственных насаждений разных возрастов позволит интенсифицировать лесное хозяйство и повысить его эффективность, а также определить качество хозяйственной деятельности в этой сфере. Цель исследования заключается в разработке критериев оценки лесных культур при таксации лесных насаждений с точки зрения необходимости проектирования лесохозяйственных мероприятий по их сохранению. Объектом изучения стали лесные насаждения искусственного происхождения хвойно-широколиственных лесов Республики Марий Эл и южно-таежных лесов Республики Удмуртии. Экспериментальными данными послужили базы данных лесных участков, включающих 11 735 ед. лесных насаждений искусственного происхождения. Выполнен анализ действующих нормативно-правовых документов и методик оценки состояния лесных культур на разных стадиях развития древостоя. Выявлена неоднозначность оценки и принятия решений по проектированию лесохозяйственных мероприятий, влияющая на успешность лесокультурного производства на лесных участках. Предложены критерии и показатели определения состояния лесных культур разных категорий лесных земель при лесоустройстве в зависимости от необходимости проведения лесохозяйственных мероприятий по сохранению лесов. В целях оптимизации процесса лесоустройства, минимизации субъективных ошибок и совершенствования системы контроля качества следует законодательно зафиксировать унифицированные критерии и алгоритмы оценки лесных культур. Нормативно-правовая база в области лесоустройства должна предусматривать обязательное внесение в документацию дополнительной информации о ранее сформированных лесных культурах. Также требуется воссоздать в лесном законодательстве положение, регламентирующее сроки и количество уходов, и обеспечить его имплементацию в лесохозяйственные регламенты и проекты освоения лесов.

**Ключевые слова:** таксация, лесные культуры, лесоустройство, государственное управление лесами, хозяйственная деятельность в лесу, оценка хозяйственной деятельности в лесу, сохранение лесов, Республика Марий Эл, Республика Удмуртия

*Для цитирования:* Черных Л.В., Черных Д.В., Черных В.Л. Оценка состояния лесных культур при лесоустройстве // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 30–49.  
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-30-49>

Original article

## Assessing the Health of Forest Plantations during Forest Inventory

*Leonid V. Chernykh*, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [LFT-7246-2024](https://orcid.org/0000-0003-3428-0701),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3428-0701>

*Dmitry V. Chernykh*, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [KIJ-1310-2024](https://orcid.org/0009-0000-7004-8374),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7004-8374>

*Valery L. Chernykh*<sup>✉</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAL-3874-2020](https://orcid.org/0000-0002-9321-5128),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9321-5128>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation;  
ChernyhLV@volgatech.net, ChernyhDV@volgatech.net, ChernyhVL@volgatech.net<sup>✉</sup>

Received on November 19, 2024 / Approved after reviewing on February 15, 2025 / Accepted on February 17, 2025

**Abstract.** Information on forest management is extremely important for decision-making by government authorities regarding forest conservation. An objective assessment of the condition of artificial plantations of different ages will allow for the intensification of forestry and increase its efficiency, as well as determine the quality of economic activity in this area. The aim of the research has been to develop criteria for assessing forest crops during forest stand inventory from the point of view of the need to design forestry measures for their conservation. Artificial plantations of coniferous-broad-leaved forests of the Republic of Mari El and south taiga forests of the Republic of Udmurtia have become the object of the research. The experimental data have been collected from databases of forest plots, including 11,735 units of artificial forest plantations. An analysis of current regulatory documents and methods for assessing the condition of forest crops at different stages of forest stand development has been carried out. The ambiguity in the assessment and decision-making process for the design of forestry measures has been revealed, affecting the success of silvicultural production in forest areas. Criteria and indicators for determining the condition of forest crops of different categories of forest lands in forest management have been proposed, depending on the need for forestry measures to preserve forests. In order to optimize the forest management process, minimize subjective errors, and improve the quality control system, unified criteria and algorithms for assessing forest crops should be legislatively established. The regulatory framework in the field of forest management should provide for the mandatory inclusion in documentation of additional information on previously formed forest crops. It is also necessary to recreate the provision in forest legislation regulating the timing and quantity of forest management measures, and to ensure its implementation in forestry regulations and forest development projects.

**Keywords:** forest inventory, forest crops, forest management, state forest management, economic activity in the forest, assessment of economic activity in the forest, forest conservation, the Republic of Mari El, the Republic of Udmurtia

**For citation:** Chernykh L.V., Chernykh D.V., Chernykh V.L. Assessing the Health of Forest Plantations during Forest Inventory. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 30–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-30-49>

*Введение*

Во всем мире остается актуальным вопрос оценки лесовосстановления ввиду важности интенсификации депонирования углерода, предотвращения эрозии почв, процессов опустынивания, улучшения общей экологической обстановки, увеличения возобновляемых ресурсов и т. д. [18–20, 23–26]. Если количественные характеристики успешности лесовосстановления косвенно можно оценить с помощью применения методов дистанционного мониторинга земли [25] с автоматизированным расчетом вегетационных индексов [20] и на основе этих данных принять решение о проведении дополнительных лесохозяйственных мероприятий, то оценки качественных характеристик для определения ресурсной базы и эффективности ее воспроизводства: породного состава, доли ценных пород искусственного происхождения в общей массе лесовозобновления на конкретных участках – неоднозначны и неуниверсальны, в то время как принятие решений должно основываться на достоверной и оперативной информации [22].

В рамках глобальной инициативы по воспроизводству лесов «Бонский вызов» (The Bonn Challenge) разрабатывается комплексная методология оценки возможностей восстановления (ROAM) для каждой страны [24]. ROAM включает в себя определение и валидацию ключевых факторов, влияющих на процессы лесовосстановления, начиная от мотивации и возможностей и заканчивая реализацией. Критерии оценки успешности лесовосстановления представляют собой систему мониторинга и оценки эффективности с точки зрения экономических факторов рыночной потребности выращиваемой древесины, сомкнутости и высоты возобновления. Также применяется концепция определения целевых лесобразующих древесных пород, предполагающая применение широкого перечня древесных пород для формирования более устойчивых лесных биогеоценозов к климатическим изменениям. Отмечается сложность, а также дороговизна наземного мониторинга и недостаточность информации, получаемой дистанционным зондированием Земли для оценки качественных показателей лесовосстановления [23].

Важнейшим источником информации в Российской Федерации для принятия решений органами государственной власти в части регулирования хозяйственной деятельности в лесах являются материалы лесоустройства. Мероприятия по сохранению лесов назначаются по данным таксации лесных насаждений, при выполнении которой проводится оценка несомкнувшихся лесных культур и лесных культур с описанием их таксационных характеристик. Правильность и своевременность проектирования мероприятий по дополнению, уходу за лесными культурами зависит от достоверности их оценки и периодичности лесоустройства. Если 2-й фактор обусловлен планом лесоустройства, утверждаемым органами исполнительной власти, то принятие решений о проведении мероприятий по сохранению лесных культур вытекает из критериев количественных и качественных показателей, определяемых при таксации леса.

Многими отечественными лесоведами отмечается недостаточность контроля, количества и качества мероприятий по дополнению и уходам за лесными культурами [2, 4, 11, 12]. Первопричиной данной проблемы является неоднозначность информации в сфере практического лесоводства [8, 21–23], т. к. на-

турное обследование несомкнувшихся лесных культур выборочными методами осуществляется в момент перевода насаждений в покрытые лесной растительностью земли [15], а при таксации уже переведенных лесных культур используют соотношение запасов элементов леса через представление формулы состава древостоя, что, в свою очередь, не является объективным критерием оценки состояния леса [1, 21] (приказ Минприроды РФ от 11.03.2019 № 150 «Об утверждении Порядка отнесения земель, предназначенных для лесовосстановления, к землям, на которых расположены леса, и формы соответствующего акта»). При лесоустройстве данный факт обуславливает массовое списание уже переведенных в покрытые лесной растительностью земли лесных культур, а площади и месторасположение несомкнувшихся лесных культур в материалах таксации указываются по данным государственного лесного реестра. Списание несомкнувшихся лесных культур не практикуется, потому что методика и точность учета с последующим документооборотом являются несопоставимыми при разном уровне обследования лесных насаждений. И наоборот, не отслеживается списание лесных культур старших возрастов по итогам проведения лесоустройства.

Также остается актуальным вопрос эффективности лесовосстановления на арендуемых лесных участках. Так, одной из мировых тенденций является менее успешное искусственное лесовосстановление в государственных лесах, переданных в разные формы аренды, одновременно отмечается, что на частных территориях лесные культуры с неудовлетворительным составом и запасом встречаются реже [1]. Данный факт полностью зависит от управленческих решений, принимаемых контролирующими органами исполнительной власти, и заинтересованности в интенсификации лесопользования хозяйствующих субъектов. В России при максимальном сроке аренды лесных участков 49 лет и обороте рубки по хвойным насаждениям в эксплуатационных лесах 81 год эффективное восстановление древостоев может быть обеспечено только за счет качественного государственного управления лесами.

Ключевым элементом такого управления является объективная оценка состояния лесных культур, определяющая необходимость мер по их сохранению. При этом здесь существует проблема отсутствия унифицированной методики полевой таксации для оценки культур, созданных различными способами. Неточная или запоздалая оценка может привести к негативным последствиям: гибели культур и их вытеснению лиственными породами, что сводит на нет все инвестиции в лесокультурное производство. Российская система лесоустройства, опирающаяся на наземную таксацию и крупномасштабные данные дистанционного зондирования, предлагает решение этой проблемы, обеспечивая комплексный мониторинг и оценку лесовосстановления, превосходя мировые аналоги.

Цель исследования – разработать систему критериев для оценки лесных культур при таксации лесных насаждений и обоснования проектирования лесохозяйственных мероприятий по их сохранению.

Задачи: выполнить анализ нормативной базы и существующих методик оценки лесных культур; рассмотреть результаты лесокультурного производства на экспериментальных участках по материалам лесоустройства; разработать систему критериев описания лесных культур и проектирования мероприятий по их сохранению.

*Объекты и методы исследования*

Объектом исследования являются лесные культуры, произрастающие в зоне южно-таежных и хвойно-широколиственных лесов европейской части Российской Федерации.

В качестве экспериментальных данных были использованы:

база данных таксационных характеристик лесов Белорецкого участкового лесничества Глазовского лесничества, расположенного в Республике Удмуртии на площади 29 120 га, включающей 7448,0 га лесных культур;

база данных таксационных характеристик лесов Сендинского и Ямбаторского участковых лесничеств Мари-Турекского лесничества в Республике Марий Эл на площади 34 441 га, в т. ч. 8353,4 га лесных культур.

Необходимо отметить, что в Республике Марий Эл объект исследования передан в аренду для осуществления заготовки древесины. Территория Белорецкого участкового лесничества в Республике Удмуртии не находится в аренде.

Анализ данных о лесных культурах в Республике Марий Эл и Удмуртской Республике выявил существенные различия. В Марий Эл средняя площадь лесных насаждений составляет 3,2 га, а медианная – 2,0 га. В Удмуртии эти показатели значительно выше: 13,5 и 7,5 га соответственно. Высокий коэффициент вариации (более 110 %) подтверждает значительный разброс в размерах территорий лесных культур в обоих регионах.

Эти результаты указывают на то, что распределение площадей лесных культур не является нормальным. Следовательно, использование среднего арифметического значения для оценки может быть неточным. Для более объективного понимания распределения площадей лесных культур рекомендуется использовать кумулятивную кривую и медиану в качестве меры центральной тенденции.

В процессе сбора и обработки полевых данных о лесах были учтены требования, изложенные в «Лесостроительных инструкциях» 2011 и 2018 гг. В новой «Лесостроительной инструкции» 2022 г. содержатся незначительные изменения в методике определения количественных и качественных характеристик лесных насаждений. Однако данные изменения не оказывают существенного влияния на надежность анализа, выполненного на основе лесостроительных баз данных (приказ Минприроды РФ от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесостроительной инструкции»).

По материалам лесоустройства оценена эффективность лесокультурного производства на всей рассматриваемой территории и выявлены факторы риска для успеха искусственного лесовосстановления.

В целях обеспечения точности и надежности характеристики состояния искусственных насаждений и несомкнувшихся лесных культур расчет и анализ количественных и качественных показателей проводили на основе данных лесоустройства на начало и конец ревизионного периода. Эти данные, полученные из системы AISPOL, проходили обязательную верификацию путем сопоставления с проектной документацией лесничеств и лесных участков [14].

Предложенные подходы к оценке состояния лесных культур соответствуют действующим нормативно-правовым актам в сфере лесоустройства и охраны лесов, а также основным принципам ведения лесного хозяйства, установленным «Лесным кодексом РФ».

*Результаты исследования и их обсуждение*

В настоящее время оценка лесных культур при таксации и инвентаризации лесов выполняется в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами. Однако анализ нормативно-справочной информации выявил недостаток критериев для объективной характеристики сомкнувшихся лесных культур в процессе таксации лесов. В частности, описание лесных культур, выполненное в ходе лесоустройства, представлено в базе данных в виде атрибутивной информации. Эта информация, хранящаяся в дополнительных полях, классифицируется по 4 категориям. Такая градация проводится по аналогии с оценкой приживаемости несомкнувшихся лесных культур, подразделяющихся на хорошие (приживаемость более 85 %, не требует дополнения), удовлетворительные (50–85 %), неудовлетворительные (25–50 %) и погибшие (менее 25 %), и отражается в итогах ежегодной инвентаризации (приказ Минприроды РФ от 04.12.2020 № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений»), проводимой в соответствии с ОСТ 56-99-93 «Культуры лесные. Оценка качества». При этом необходимо отметить, что приведенные градации не закреплены нормативно-правовыми актами, а упоминание о 1-й и 2-й категориях лесных культур является частью комплексной оценки с присвоением 1-й категории сплошным лесным культурам, приживаемость которых составляет более 80 %.

Также существует методика оценки лесных культур всех возрастов, содержащаяся в «Технических указаниях по проведению инвентаризации лесных культур, защитных лесных насаждений, питомников, площадей с проведенными мерами содействия естественному возобновлению леса и вводу молодняков в категорию ценных древесных насаждений» от 1989 г., которая основывается на расчете комбинированных коэффициентов качества лесных культур, учитываемых по региональным нормативам количественных показателей эталонных насаждений, разнице фактических и эталонных высот [3] и диаметров [5] искусственных насаждений и естественного возобновления в них. Отметим, что данную методику невозможно применить для оценки качества комбинированного лесовосстановления, саженцев с закрытой корневой системой [13] с уменьшенным количеством посадочных мест на лесокультурной площади, а также при отсутствии региональных нормативов и основных положений ведения лесного хозяйства по субъектам страны. Таким образом, в настоящее время нет общепринятого способа оценки состояния сомкнувшихся лесных культур и лесных культур всех возрастов, заложенных комбинированным способом [10].

В соответствии с действующей лесоустроительной инструкцией, определение относительной полноты в молодняках и лесных культурах со средней высотой менее 4 м осуществляется по соотношению фактического количества деревьев и нормативного с условием, что при полноте 1,0 должно быть 9600 шт./га хвойных деревьев или 11 900 шт./га мягколиственных. Одновременно с этим правилами лесовосстановления регламентируется перевод лесных культур в покрытую лесом площадь со средней высотой насаждений 0,8 м в возрасте 7 лет и при количестве деревьев 1,7 тыс. шт./га, что соответствует требованию тех же правил к посадке саженцев с закрытой

корневой системой, когда количество высаживаемых растений должно быть не менее 2,0 тыс. шт./га. Отсюда следует, что лесные культуры, переведенные в покрытые лесной растительностью земли, с приживаемостью 85 % и оценкой «хорошие» при наличии естественного возобновления будут считаться погибшими, т. к. их относительная полнота составляет менее 0,2 при минимальной относительной полноте молодняков для отнесения к покрытым лесной растительностью землям 0,4.

При этом искусственными насаждениями, согласно лесоустроительной инструкции, считаются древостои с преобладанием древесных пород искусственного происхождения по запасу яруса древостоя. Такой подход к оценке лесных культур приравнивает комбинированные лесные культуры к погибшим или в лучшем случае неудовлетворительным.

Если при оценке лесных культур руководствоваться только лесоустроительной инструкцией, может возникнуть неоднозначность в их описании. Так, при разнице средних высот лесных культур и естественного возобновления менее 3 м весь древостой таксируется как один ярус и по разнице в количестве деревьев будет отнесен к неудовлетворительным или погибшим лесным культурам, т. к. лесными культурами считают только древостои с участием элементов леса искусственного происхождения с 5 ед. При разнице средних высот от 3 до 6 м ярус лесных культур таксируется отдельно и ставится в описании на 1-е место, а оценка качества искусственного лесовосстановления производится только с учетом фактической приживаемости. В таких случаях лесные культуры теневыносливых древесных пород могут классифицироваться как хорошие или удовлетворительные. При разнице средних высот древостоев более 6 м на 1-е место ставится ярус естественного возобновления, а категорию земель рекомендуют указывать как насаждение естественного происхождения с лесными культурами под пологом, а с учетом приживаемости только угнетенных лесных культур ставится положительная оценка.

Правилами лесовосстановления регламентируются дополнения, агротехнические и лесоводственные уходы за несомкнувшимися лесными культурами, но после перевода насаждения в покрытую лесом площадь вступают в силу правила ухода за лесами (приказ Минприроды РФ от 30.07.2020 № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами»), предполагающие проектирование рубок осветления и прочисток по критерию относительной полноты с 0,8 ед.

Получается, что планирование рубок ухода в искусственных насаждениях начинается только после проведения таксации лесных насаждений и при количественном соотношении лесных культур и естественного возобновления 1 : 4, когда заглушение листовыми породами уже произошло, а категория земель классифицируется в лучшем случае как насаждение с лесными культурами. Такое противоречие при проектировании рубок ухода в молодняках усиливает то, что объем мероприятий по сохранению лесов в части уходов за молодняками при создании проектной документации всех уровней распределяется на 10 лет, т. к. очередность рубок ухода была упразднена действующими правилами ухода за лесом.

В настоящее время при оценке состояния лесных культур пользуются рекомендациями ФГБУ «Рослесинфорг» (табл. 1).

Таблица 1

**Оценка состояния лесных культур согласно указаниям ФГБУ «Рослесинфорг»**  
**The assessment of the condition of forest crops according to the instructions**  
**of the Federal State Budgetary Institution “Roslesinforг”**

Состояние лесных культур	Несомкнувшиеся	Сомкнувшиеся
	Приживаемость, %	Относительная полнота без примеси, 0,1 ед.
Хорошее	81–100	0,8–1,0
Удовлетворительное	25–80	0,6–0,7
Неудовлетворительное	Любая с отклонением от технологии	0,4–0,5 – молодняки 0,3–0,5 – средневозрастные и старше
Погибшие	24 и менее	0,3 и меньше – молодняки 0,2 и меньше – средневозрастные и старше

В соответствии с данной рекомендацией к хорошим и удовлетворительным несомкнувшимся лесным культурам могут быть отнесены участки, требующие дополнения. Отметим, что, согласно правилам лесовосстановления, такая оценка может повлиять на отсутствие проектирования лесохозяйственных мероприятий.

Наличие сомкнутого яруса (полнота 0,4 и более) естественного возобновления в несомкнувшихся лесных культурах не воздействует на характеристику при лесоустройстве самих лесных культур, хотя для их выживания в таких условиях и для решения задач повышения продуктивности лесов и эффективности депонирования и консервации углерода [16] необходимо проектирование агротехнических и лесоводственных уходов большей интенсивности [7].

На практике относительная полнота лесных культур без примеси рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{\text{лк}} = \frac{\sum_{j=1}^m ks_j \sum_{i=1}^n p_i}{10},$$

где  $P_{\text{лк}}$  – относительная полнота лесных культур, ед.;  $n$  – число элементов леса яруса, ед.;  $m$  – число элементов леса искусственного происхождения яруса, ед.;

$\sum_{j=1}^m ks_j$  – сумма коэффициентов состава элементов леса искусственного происхождения,  $j = 1, 2, 3 \dots m$ , ед.;  $\sum_{i=1}^n p_i$  – общая относительная полнота яруса,  $i = 1, 2, 3 \dots n$ , ед.

Таким образом, к хорошим лесным культурам зачастую могут быть отнесены только перегущенные монокультуры, требующие проведения рубок ухода. Хотя с точки зрения профилактики лесных пожаров и улучшения пожаростойкости лесных насаждений примесь лиственных пород необходима [6, 9].

Данные различия в нормативной базе и методиках оценки состояния лесных культур обуславливают недостаточность контроля, несвоевременность и низкое качество выполнения мероприятий по сохранению искусственных насаждений. При этом методика и критерии оценки покрытых лесом земель искусственного происхождения не регламентированы.

В соответствии с действующим лесным законодательством, весь комплекс мероприятий по сохранению лесов в лесничестве или на арендованном участке назначается и выполняется с минимальными сроками в течение ревизионного периода, с обязательным контролем и приемкой проектируемых мероприятий органами исполнительной власти субъекта Федерации.

В табл. 2 приведены результаты лесокультурного производства на лесном участке площадью 34 441 га, расположенном на территории Мари-Турекского лесничества Республики Марий Эл.

Таблица 2

**Состояние лесных культур на лесном участке Мари-Турекского лесничества  
Республики Марий Эл**  
**The condition of forest crops in the forest area of the Mari-Tureksky Forestry  
of the Republic of Mari El**

Преобладающая порода	Площадь лесных культур разного состояния, га								Погибшие ЛК, га	Погибшие Н/ЛК, га
	хорошее		удовлетворительное		неудовлетворительное		итого			
	ЛК	Н/ЛК	ЛК	Н/ЛК	ЛК	Н/ЛК	ЛК	Н/ЛК		
<i>Культуры ревизионного периода</i>										
Ель	1,7	17,0	34,4	48,1	0,9	7,1	37,0	72,2	0	0
Лиственница	0	3,9	0	21,5	0	0	0	25,4	0	0
Сосна	5,0	18,2	3,8	55,2	8,5	1,1	17,3	74,5	0	0
<i>Итого</i>	6,7	39,1	38,2	124,8	9,4	8,2	54,3	172,1	0	0
<i>Культуры старших возрастов</i>										
Ель	121,2	0	533,7	0	346,3	0	1001,2	0	51,7	0
Лиственница	11,1	0	2,7	0	9,5	0	23,3	0	0	0
Сосна	942,2	0	1400,8	0	667,5	0	3010,5	0	17,2	0
Тополь	5,9	0	5,5	0	0	0	11,4	0	0	0
<i>Итого</i>	1080,4	0	1942,7	0	1023,3	0	4046,4	0	68,9	0
<i>Всего</i>	1087,1	39,1	1980,9	124,8	1032,7	8,2	4100,7	172,1	68,9	0
<i>Кроме того, насаждение с лесными культурами*</i>										
Береза	0	0	0	0	4,3	0	4,3	0	2256,1	0
Ива	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0
Клен	0	0	0	0	0	0	0	0	7,3	0
Липа	0	0	0	0	0	0	0	0	987,0	0
Ольха серая	0	0	0	0	0	0	0	0	11,9	0
Осина	0	0	0	0	0	0	0	0	744,5	0
<i>Итого</i>	0	0	0	0	4,3	0	4,3	0	4007,4	0
<i>Всего</i>	1087,1	39,1	1980,9	124,8	1037,0	8,2	4105,0	172,1	4076,3	0
<i>Всего создано</i>								8353,4		

Примечание: ЛК – лесные культуры; Н/ЛК – несомкнутые лесные культуры; \* – в т.ч. культуры под пологом леса.

Оценка состояния лесных культур выполнена по материалам лесоустройства 2016 г. Выявлено, что основное производство лесных культур осуществлялось в 1980–2010-х гг. действовавшим в то время леспромхозом. 84,2 % лесных

культур были созданы в липово-кисличниковом и липово-широкотравном типах леса, которые признаны наиболее производительными. При этом распространенными типами лесорастительных условий являются субори и сурамени, занимающие 90,1 % площади всех лесных культур. Следует отметить, что характеристики лесных культур табл. 2 соответствуют данным проектов освоения лесов, прошедших государственную экспертизу в 2018 г.

В настоящее время в Мари-Турекском лесничестве из учтенных лесных культур разного возраста на исследуемом лесном участке только 36,0 % насаждений имеют устойчивый положительный лесокультурный эффект. Погибшие лесные культуры в основном представлены искусственными насаждениями ели. Главной причиной отпада таких насаждений является отсутствие или несвоевременность ухода, что приводит к заглушению мягколиственными породами. Это связано с более низкими интенсивностью роста на стадии смыкания крон и общей конкурентоспособностью у искусственных древостоев ели, чем у светлохвойных пород [17]. Все причины гибели лесных культур (га) на участке в Мари-Турекском лесничестве Республики Марий Эл (по материалам лесоустройства 2016 г.) перечислены ниже:

Вымокание.....	4,5
Высыхание.....	40,1
Заглушение мягколиственными породами.....	4040,3
Недостаточная интенсивность рубок ухода.....	6,0
Неблагоприятные климатические условия.....	22,9
Без указания причин.....	1007,7
Всего погибших и неудовлетворительных лесных культур.....	5121,5

По проектам освоения лесов на арендных участках, общая площадь искусственных насаждений сократилась на 1836,9 га по сравнению с договорами аренды лесных участков 2008 г., причем массовых лесных пожаров не происходило. Начиная с 1921 г. общая площадь созданных лесных культур на лесном участке составляла 8353,4 га из них за этот период погибло 4076,3 га, или 48,8 %. Поскольку лесной участок был передан в аренду в 2008 г., можно заключить, что проблема гибели лесных культур в лесничестве существовала уже до указанного года.

Тенденция сокращения территории искусственных насаждений также подтверждается на уровне субъекта Федерации. Так, по данным лесного плана Республики Марий Эл от 2012 г., с 1921 по 1992 г. было создано 429,5 тыс. га лесных культур, из которых сохранилось и учтено лесоустройством 244,9 тыс. га (распоряжение главы Республики Марий Эл от 16.10.2012 № 309-рг «Об утверждении Лесного плана Республики Марий Эл»). Отмечается, что причинами гибели стали пожары 1972 г., частичное затопление территории в связи с повышением уровня Чебоксарской гидроэлектростанции и заглушение мягколиственными породами. В Республике Марий Эл, по данным государственного лесного реестра (форма № 1), за период с 2008 по 2019 г. значительно сократилась площадь сомкнувшихся лесных культур – с 224,0 до 202,2 тыс. га.

Рассмотрим оценку состояния лесных культур в Белорецком участковом лесничестве Глазовского лесничества Республики Удмуртии (табл. 3). С 70-х гг. на данной территории действовал леспромхоз, который заготавливал древесину методом концентрированных рубок и восстанавливал вырубку преимущественно лесными культурами ели.

Таблица 3

**Состояние лесных культур Белорецкого участкового лесничества Глазовского лесничества Республики Удмуртии**  
**The condition of forest crops of the Beloretsky District Forestry of the Glazovsky Forestry of the Republic of Udmurtia**

Преобладающая порода	Площадь лесных культур разного состояния, га								Погибшие ЛК, га	Погибшие Н/ЛК, га
	хорошее		удовлетворительное		неудовлетворительное		итого ЛК	итого Н/ЛК		
	ЛК	Н/ЛК	ЛК	Н/ЛК	ЛК	Н/ЛК				
<i>Культуры ревизионного периода</i>										
Ель	4,9	86,5	91,8	97,0	0	6,0	96,7	189,5	0	0
<i>Культуры старших возрастов</i>										
Ель	12,2	0	454,8	0	0	0	467,0	0	0	0
Сосна	88,3	0	446,3	0	0	0	534,6	0	0	0
<i>Итого</i>	100,5	0	901,1	0	0	0	1001,6	0	0	0
<i>Всего</i>	105,4	86,5	992,9	97,0	0	6,0	1098,3	189,5	0	0
<i>Кроме того, культуры под пологом леса</i>										
Береза	0	0	0	0	154,3	0	154,3	0	15,0	0
Осина	0	0	0	0	4,8	0	4,8	0	0	0
<i>Итого</i>	0	0	0	0	159,1	0	159,1	0	15,0	0
<i>Кроме того, насаждение с лесными культурами</i>										
Береза	0	0	0	0	4,2	0	4,2	0	4753,2	0
Ель	0	0	0	0	0	0	0	0	45,0	0
Ива	0	0	0	0	0	0	0	0	1,7	0
Липа	0	0	0	0	0	0	0	0	383,3	0
Ольха белая	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3	0
Осина	0	0	0	0	0	0	0	0	797,4	0
<i>Итого</i>	0	0	0	0	4,2	0	4,2	0	5981,9	0
<i>Всего</i>	105,4	86,5	992,9	97,0	163,3	6,0	1261,6	189,5	5996,9	0
<i>Всего создано</i>								7448		

Примечание: Условные обозначения – см. табл. 2.

По завершении заготовки древесины на территории лесничества лесной фонд в основном представлен насаждениями мягколиственных пород среднего возраста. В 1985 г. было принято решение о формировании Северного государственного охотничьего комплексного заказника, в результате чего созданные лесные культуры остались без управления со стороны какого-либо хозяйствующего субъекта. На землях лесничества искусственные насаждения созданы в свежих и влажных дубравах (19,2 %), а также в свежих и влажных сложных субориях (75,3 %). Наиболее распространенными типами леса, где встречаются насаждения искусственного происхождения, являются ельники кисличный и липовый (64,1 %), а также снытьевый и широколиственный (30,1 %).

По материалам лесоустройства было выявлено, что доля погибших лесных культур в Белорецком участковом лесничестве составила 80,5 %. Также при таксации леса в соответствии с лесоустроительной инструкцией были отмечены лесные культуры, сохранившиеся под пологом леса, хотя изначально они создавались на открытом пространстве.

Анализ информации о лесных культурах, в т. ч. о несомкнувшихся, показал, что при переводе их в категорию покрытых лесом земель причины неудовлетворительного состояния и гибели таких насаждений не фиксируются. Факторы, приведшие к гибели лесных культур (га) в Белорецком участковом лесничестве Глазовского лесничества Республики Удмуртии, в соответствии с документацией, следующие:

Заглушение мягколиственными породами.....	641,7
Без указания причин.....	5524,5
Всего погибших и неудовлетворительных лесных культур.....	6166,2

В большинстве случаев выявление причин гибели деревьев посредством таксации леса стало невозможным из-за значительного временного лага. Тем не менее, можно предположить, что отмирание лесных культур связано с недостаточной реализацией лесохозяйственных мероприятий, направленных на поддержание и сохранение насаждений.

В южно-таежных лесах на лесосеках после рубки спелых и перестойных древостоев естественное лесовосстановление проходит успешно за счет лиственных пород вследствие природных процессов – для Глазовского лесничества это благоприятные лесорастительные условия и высокая лесистость (более 95 %).

Согласно лесному плану Республики Удмуртии, с 2008 по 2018 гг. также произошло уменьшение площади покрытых лесом земель лесных культур по всему лесному фонду на 68,9 тыс. га. (указ главы Удмуртской Республики от 18.02.2019 № 17 «Об утверждении Лесного плана Удмуртской Республики»).

Анализ современных нормативных документов в сфере лесного хозяйства выявил пробелы в их структуре и содержании. В частности, отсутствует унифицированная табличная форма для представления данных о площади искусственных насаждений по категориям земель. Кроме того, формы государственного лесного реестра, доступные для ознакомления, представлены не для всех лесничеств.

Все это приводит к невозможности принятия решений органами исполнительной власти в части интенсификации лесопользования и регламентирования объемов мероприятий по сохранению лесов.

Также стоит отметить, что на лесных участках Мари-Турекского и Глазовского лесничеств отсутствуют погибшие несомкнувшиеся лесные культуры. Это обусловлено тем, что в лесоустроительной инструкции нет методики их оценки, что, в свою очередь, делает невозможным обследование таких площадей при таксации леса в соответствии с правилами лесовосстановления. Кроме того, не наблюдается связи в документообороте между лесничеством и лесостроительством в части учета, перевода в покрытую лесом площадь и оценки несомкнувшихся лесных культур.

Сложность оценки состояния лесных культур и определения категории земель обусловлена множественной вариацией их таксационной характеристики на различных стадиях развития древостоя. Так, в действующей лесоустроительной инструкции нет четких критериев взаимообусловленности происхождения элемента леса и категории земель в тех случаях, когда лесные культуры формируют угнетенный ярус под пологом мягколиственных пород. В лесостроительных базах данных можно встретить категорию земель «культуры под

пологом леса», что является некорректным, т. к. лесные культуры изначально не создавались под пологом 1-го яруса, а возраст разных ярусов одинаков. Такие лесные культуры к возрасту спелости верхнего яруса, как правило, погибают, что уже на стадии разницы в высотах в 6 м должно находить отражение в их оценке как «погибшие» и фиксироваться по категории земель как «насаждения с лесными культурами». Данный методический подход опирается на отсутствие формальных признаков отнесения к несомкнувшимся лесным культурам под пологом леса по возрастной структуре согласно правилам лесовосстановления и явную недостаточность запаса культур в соответствии с п. 272 лесоустроительной инструкции (приказ Минприроды РФ от 05.08.2022 № 510). Возникает риск неоправданной положительной оценки состояния угнетенных лесных культур, т. к. теневыносливые виды могут иметь высокую приживаемость даже без проведения должных уходов.

Одновременно с этим лесные культуры, изначально создаваемые под пологом древостоя, с целью повышения санитарно-гигиенических функций или изменения состава и структуры малоценных и низкополотных лесных насаждений должны оцениваться в соответствии с правилами лесовосстановления по аналогии с несомкнувшимися лесными культурами. Таким образом, подпологовые лесные культуры следует обеспечить всем комплексом уходов, предписанным правилами лесовосстановления и правилами ухода за лесами с комбинированием мероприятий по заготовке древесины путем проектирования и проведения рубок, например, переформирования.

Методика оценки лесных культур, созданных комбинированным способом на части лесокультурной площади, также не регламентирована при лесоустройстве. Согласно ОСТ 56-99-93, такие лесные культуры относятся ко 2-й категории. Для получения положительной оценки (хорошей) их приживаемость должна составлять 50 %. Это требование не предусмотрено лесоустроительной инструкцией, а при таксации оценка осуществляется по методике, применяемой для сплошных лесных культур.

После перевода комбинированных лесных культур в покрытую лесом площадь в большинстве случаев они считаются погибшими, а их категория земель таксирруется как «насаждение естественного происхождения с лесными культурами» с соответствующими критериями проектирования рубок ухода за лесами.

В ходе подготовительных работ по таксации в рамках лесоустройства осуществляется сбор комплексной информации о количественных и качественных показателях несомкнувшихся лесных культур, а также об их площади и границах на лесном участке. Для подтверждения собранных данных в полевых условиях проводится их визуальная верификация непосредственно на месте. Оценка состояния несомкнувшихся лесных культур играет решающую роль при проектировании мероприятий по охране и сохранению лесов в рамках лесоустройства.

Главная цель объективной оценки состояния лесных культур должна заключаться в правильном и своевременном планировании мероприятий по их сохранению, а не в максимально возможном сохранении искусственных древостоев для формирования перегущенных монокультур. Несомкнувшиеся лесные культуры должны ежегодно обследоваться и оцениваться по единой унифицированной методике как при лесоустройстве, так и при ин-

вентаризации, приемке лесных культур и переводе их в покрытые лесной растительностью земли. Такой подход к оценке лесных культур позволит создать целостную систему учета и принятия решений при лесовосстановлении и лесоразведении.

Остается пробел в описании таксационных характеристик комбинированных лесных культур. В табл. 4 приведены критерии для описания состояния несомкнувшихся лесных культур при лесоустройстве. Так, возможен вариант разделения по ярусам древостоя искусственного происхождения и естественного возобновления без ограничений по полноте и высоте. Оценку успешности комбинированного лесовосстановления на всех стадиях развития древостоя необходимо проводить исходя из процентного отношения проектной и фактической относительной полноты и корневого запаса.

Таблица 4

**Предлагаемые критерии для оценки состояния несомкнувшихся лесных культур при лесоустройстве (приживаемость, %)**  
**The proposed criteria for assessing the condition of the non-closed forest crops in forest management (survival rate, %)**

Состояние лесных культур	Сплошные	Комбинированные
Хорошее	85 и более, наличие семенного лесовозобновления, без смыкания крон	85 и более, наличие естественного возобновления ценных пород в количестве, не менее числа посадочных мест лесных культур пропорционально площади
Удовлетворительное	85 и более, отсутствие семенного лесовозобновления или наличие порослевого лесовозобновления, без смыкания крон	50 и более, наличие естественного возобновления ценных пород в количестве, не менее числа посадочных мест лесных культур пропорционально площади, наличие возобновления нецелевых древесных пород
Неудовлетворительное	От 25 до 85, наличие сомкнутого яруса естественного возобновления мягколиственных пород порослевого происхождения	От 25 до 50, наличие сомкнутого яруса естественного возобновления мягколиственных пород порослевого происхождения
Погибшие	Менее 25	Менее 25

Согласно правилам лесовосстановления, комбинированный способ создания лесных культур назначается при наличии подроста от 0,5 или 1 тыс. шт./га в зависимости от гигротопности лесорастительных условий, а в покрытые лесной растительностью земли переводятся участки с количеством основных древесных пород от 1,7 или 2 тыс. шт./га по такому же принципу. Отсюда следует, что лесные культуры, создаваемые комбинированным способом, должны будут занимать минимум 30 % площади. При этом учесть приживаемость комбинированных лесных культур при таксации зачастую невозможно, но определить запас древостоя по элементам леса в любом случае необходимо. Важно учесть, что, в соответствии с ОСТ 56-99-93, приживаемость лесных культур 2-го класса может достигать 50 %. Данный подход позволяет минимизировать риски необоснованной положительной оценки лесных культур,

находящихся в угнетенном ярусе. Запасы древесины рекомендуется рассчитывать отдельно для каждого яруса по элементам леса, что обеспечивает более точную и объективную характеристику.

Правила ухода за лесом регламентируют оптимальную относительную полноту для древостоев по группам типов леса и породному составу, исходя из этого критерия и необходимости примеси лиственных пород для обеспечения пожароустойчивости древостоев предлагаются следующие критерии оценки сомкнувшихся лесных культур (табл. 5).

Таблица 5

**Предлагаемые критерии для оценки состояния сомкнувшихся лесных культур и проектирования мероприятий по их сохранению**  
**The proposed criteria for assessing the condition of closed forest crops and designing measures for their conservation**

Состояние лесных культур	Значение критерия оценки состояния лесных культур				Лесохозяйственное мероприятие, проектное решение
	сомкнувшиеся		комбинированные сомкнувшиеся		
	состав верхнего яруса	относительная полнота культур без примеси, 0,1 ед.	запас лесных культур, % от общего запаса всех ярусов древостоя	ярус	
Хорошее	Чистые	0,5–0,7	50 и более	1-й	Не требуется
	С примесью лиственных пород от 3 ед. и более	0,5–0,6			
Удовлетворительное	Любой	0,3–0,4	От 30 до 50	1-й	Оценка необходимости проведения мероприятий по повышению продуктивности насаждений
Неудовлетворительное	Чистые	0,8 и более	От 15 до 30	2-й	Рубки ухода
	С примесью лиственных пород от 3 ед. в составе и более	0,7 и более			
Погибшие	–*	0,3 и меньше – молодняки; 0,2 и меньше – средневозрастные и старше	Менее 15	–	Рубки реконструкции, агролесомелиоративные мероприятия. Обоснование способа лесовосстановления**

\*Категория земель, не относящаяся к искусственным насаждениям. \*\*При гибели лесных культур необходимо проанализировать причины и учесть эффективность способа лесовосстановления при дальнейшем ведении хозяйства. Например, при заглущении лесных культур мягколиственными породами следует пересматривать интенсивность и количество агротехнических и лесоводственных уходов в стадии смыкания крон, а в более старших возрастах – интенсивность и сроки повторения рубок ухода за лесами, густоту создаваемых лесных культур, тип посадочного материала и т. п. Принятие решения о списании лесных культур с их переводом, в т. ч. и сомкнутых насаждений, в категорию земель «естественные насаждения с лесными культурами» или «естественные насаждения» лучше проводить во время таксации. Если естественное возобновление леса не наблюдается, а лесные культуры погибли, возникает необходимость обосновать переход к иному способу лесовосстановления. Это решение должно быть принято на основе анализа природных процессов или по результатам обследований, по итогам которых можно рекомендовать меры для поддержки естественного возобновления.

Ограничением является п. 272 лесоустроительной инструкции (приказ Минприроды РФ от 05.08.2022 № 510), регламентирующий определение лесокультурных категорий лесных земель. Относительные полноты и составы древостоев для оценки состояния лесных культур соответствуют средним критериям проектирования рубок ухода. Их дифференциация по лесорастительным зонам и группам типов леса в правилах ухода за лесом незначительна, сама оценка не влияет на планирование лесохозяйственного мероприятия, а только отображает его эффективность и интенсивность. Такая оценка может быть агрегирована на любой уровень государственного управления лесами и включена в критерий результативности выполнения мероприятий по сохранению лесов.

### *Выводы*

1. Анализ экспериментальных данных выявил отклонение распределения количества таксационных выделов по площади лесных культур от нормального закона. Следовательно, использование среднего арифметического в качестве репрезентативной меры центральной тенденции представляется некорректным. Вместо этого для более точной характеристики распределения и установления его центра следует применять кумулятивную кривую и медиану.

2. В связи с отсутствием государственного надзора за целевыми показателями лесного фонда, полученными в результате лесоустройства, органами государственной власти в сфере лесных отношений не принимаются своевременные решения по оптимизации мероприятий, направленных на сохранение и использование лесных ресурсов. Это, в свою очередь, ведет к сокращению площадей искусственных насаждений.

3. Государственный контроль за проектированием и выполнением мероприятий по сохранению лесов эффективней в арендуемых лесах, как и лесокультурное производство.

4. В современных лесоустроительных справочниках и базах данных, используемых в лесном хозяйстве, отсутствует категория земель «комбинированные лесные культуры». Устранение этого недостатка возможно путем разработки и реализации алгоритма оценки такого состояния насаждения с последующим включением в действующую инструкцию по лесоустройству.

5. С целью повышения эффективности лесоустройства, снижения влияния человеческого фактора и улучшения контроля качества необходимо законодательно установить четкие критерии и алгоритмы оценки лесных культур.

6. Законодательство в области лесоустройства должно включать обязательное требование по указанию дополнительных сведений о ранее созданных лесных культурах.

7. Необходимо восстановить в лесном законодательстве норму, определяющую сроки и количество уходов за лесными культурами, и обеспечить обязательное включение в лесохозяйственные регламенты и проекты освоения лесов.

8. В лесных культурах рубки осветления и прочистки обязательны в 3-летний срок после утверждения материалов таксации. Необходимым является и повторное обследование всех участков через 5 лет с последующим прове-

дением при необходимости мероприятий по сохранению лесов в соответствии с условиями договоров аренды и проектов освоения лесов. Данный регламент, предусматривающий непрерывный мониторинг и управление на уровне отдельных участков, соответствует принципам участкового метода непрерывного лесоустройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алентьев П.Н. Проблемы повышения эффективности лесных культур на вырубках, зарастающих лиственными породами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2005. № 6. С. 37–43.

Alentjev P.N. Problems of Increasing the Efficiency of Forest Crops on Cleared Space Overgrown by Deciduous Species. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2005, no. 6, pp. 37–43. (In Russ.).

2. Башегуров К.А., Белов Л.А., Залесов С.В., Осипенко А.Е., Попов А.С., Розинкина Е.П. Эффективность естественного и искусственного лесовосстановления на гарях Западно-Сибирского Северо-таежного равнинного лесного района // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 2. С. 4–15.

Bashegurov K.A., Belov L.A., Zalesov S.V., Osipenko A.E., Popov A.S., Rozinkina E.P. Efficiency of Natural and Artificial Reforestation in the Burnt Out Areas of the West Siberian North-Taiga Lowland Forest Region. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2023, no. 2, pp. 4–15. (In Russ.).

<https://doi.org/10.51318/FRET.2023.39.51.001>

3. Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Молоствовкин М.Д., Пак К.А. Сравнительные результаты производства лесных культур сосны на задерненных вырубках // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1(57). С. 88–98.

Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Molostovkin M.D., Pak K.A. Comparative Results of Pine Plantation Production on Grassy Clearings. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 1(57), pp. 88–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.88>

4. Глушко С.Г., Галиуллин И.Р., Прохоренко Н.Б., Шайхразиев Ш.Ш. Оценка культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях республики Татарстан // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 26–33.

Glushko S.G., Galiullin I.R., Prokhorenko N.B., Shaikhraziev Sh.Sh. Evaluation of Pine (*Pinus sylvestris* L.) Cultures in the conditions of the Republic of Tatarstan. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 26–33. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-26-33>

5. Демаков Ю.П. Особенности радиального прироста деревьев в культурах лиственницы сибирской // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1(57). С. 43–57.

Demakov Yu.P. Features of Radial Growth of Trees in Siberian Larch Cultures. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 1(57), pp. 43–57. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.43>

6. Ермоленко А.А. Анализ состояния и причин изменения лесистости в Центральном федеральном округе: сложившаяся практика и возможные решения // Лесохоз. информ. 2018. № 4. С. 55–65.

Ermolenko A.A. Analysis of the State and Causes of Changes in Forest Cover in the Central Federal District: Current Practice and Possible Solutions. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2018, no. 4, pp. 55–65. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.06>

7. Желдак В.И. Вопросы адаптивно-целевого применения лесоводственных рубок в целях повышения эффективности депонирования и консервации углерода лесами // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 1(57). С. 21–42.

Zheldak V.I. Issues of Adaptive-Targeted Use of Silvicultural Cuttings in Order to Increase the Efficiency of Carbon Sequestration and Conservation by Forests. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 1(57), pp. 21–42. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.1.21>

8. Желдак В.И. Лесоводственное обеспечение формирования установок по решению задач смягчения изменений климата и адаптации лесного комплекса к меняющимся условиям // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 3(59). С. 6–23.

Zheldak V.I. Forestry support for the formation of attitudes to address climate change mitigation and adaptation of the forest complex to changing conditions. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 3(59), pp. 6–23. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.3.6>

9. Невидомов А.М., Петухов Н.В. Экологический мониторинг лесов Нижегородской области как основа разработки и внедрения системы неотложных мероприятий по оптимизации природной среды // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 1. С. 15–24.

Nevidomov A.M., Petukhov N.V. Ecological Monitoring of Forests of Nizhny Novgorod Region as a Basis for Development and Implementation of Priority Measures on Optimization of Natural Environment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2002, no. 1, pp. 15–24. (In Russ.).

10. Романов Е.М. Воспроизводство лесов в новой стратегии перехода к устойчивому развитию лесного сектора России // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 1(49). С. 5–22.

Romanov E.M. Regeneration of Forests in a New Strategy for the Transition to the Sustainable Development of Russian Forest Sector. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2021, no. 1(49), pp. 5–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.1.5>

11. Романов Е.М., Еремин Н.В., Нуреева Т.В. Состояние и проблемы воспроизводства лесов России // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2007. № 1. С. 5–14.

Romanov E.M., Eremin N.V., Nureeva T.V. The State and Problems of Forest Restoration in Russia. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2007, no. 1, pp. 5–14. (In Russ.).

12. Романов Е.М., Нуреева Т.В., Еремин Н.В. Обоснование критериев и показателей перевода лесных культур в режим ускоренного лесовыращивания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 5. С. 7–13.

Romanov E.M., Nureeva T.V., Eremin N.V. Justification of Criteria and Indicators for Accelerated Growing of Forest Cultures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2012, no. 5, pp. 7–13. (In Russ.).

13. Романов Е.М., Самосудов А.Е., Нуреева Т.В., Бекмансуров М.В. Дифференцированное применение посадочного материала при создании лесных культур // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 2(58). С. 6–29.

Romanov E.M., Samosudov A.E., Nureeva T.V., Bekmansurov M.V. Differentiated Use of Planting Stock in Establishing Forest Plantations. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 2(58), pp. 6–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.2.6>

14. Св. о госрегистрации программы для ЭВМ № 2020612490 РФ. Автоматизированная обработка лесостроительной информации AISPOL: № 2019667371: заявл. 19.12.2019; опубл. 25.02.2020 / Д.В. Черных, Л.В. Черных, В.Л. Черных; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Марлеспроект».

Chernykh D.V., Chernykh L.V., Chernykh V.L. *Certificate of State Registration of a Computer Program no. 2020612490 RF. Automated Processing of Forest Management Information AISPOL*, 2020. (In Russ.).

15. Сунгуров Р.В., Сунгурова Н.Р., Гаевский Н.П. Оценка методов инвентаризации лесных культур // Уч. зап. Петрозаводск. гос. ун-та. 2015. № 6(151). С. 85–88.

Sungurov R.V., Sungurova N.R., Gaevskiy N.P. Evaluation of Different Methods Employed in Forest Crops' Inventory. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* = Proceedings of Petrozavodsk State University, 2015, no. 6(151), pp. 85–88. (In Russ.).

16. Хлюстов В.К., Ганихин А.М. О методике цифровизации нормативов биологической продуктивности древостоев // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 4(60). С. 6–21.

Khlyustov V.K., Ganikhin A.M. Methodology for Developing Regional Standards of the Biological Productivity of Forest Stands. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2023, no. 4(60), pp. 6–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.4.6>

17. Abijith D., Saravanan S. Assessment of Land Use and Land Cover Change Detection and Prediction Using Remote Sensing and CA Markov in the Northern Coastal Districts of Tamil Nadu, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, pp. 86065–86067. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15782-6>

18. Berkowitz J.F. Development of Restoration Trajectory Metrics in Reforested Bottomland Hardwood Forests Applying a Rapid Assessment Approach. *Ecological Indicators*, 2013, vol. 34, pp. 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.025>

19. Da Silva Lopes J., Kiperstok A., de Figueirêdo M.C.B., de Almeida Neto J.A., Rodrigues L.B. Assessing the Economic and Environmental Performance of Cleaner Production Practices in Eucalyptus Planted Forests Using Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 380, part 2, art. no. 134757.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134757>

20. Gerlein-Safdi C., Keppel-Aleks G., Wang F., Frothingham S., Mauzerall D.L. Satellite Monitoring of Natural Reforestation Efforts in China's Drylands. *One Earth*, 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.12.015>

21. Knoke T., Kindu M., Jarisch I., Gosling E., Friedrich S., Bödeker K., Paul C. How Considering Multiple Criteria, Uncertainty Scenarios and Biological Interactions May Influence the Optimal Silvicultural Strategy for a Mixed Forest. *Forest Policy and Economics*, 2020, vol. 118, art. no. 102239. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102239>

22. Lawrence A. Adapting through Practice: Silviculture, Innovation and Forest Governance for the Age of Extreme Uncertainty. *Forest Policy and Economics*, 2017, vol. 79, pp. 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.07.011>

23. Nunes S., Gastauer M., Cavalcante R.B.L., Ramos S.J., Caldeira Jr. C.F., Silva D., Rodrigues R.R., Salomão R., Oliveira M., Souza-Filho P.W.M., Siqueira J.O. Challenges and Opportunities for Large-Scale Reforestation in the Eastern Amazon Using Native Species. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 466, art. no. 118120.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118120>

24. Thomas S., Dargusch P., Harrison S., Herbohn J. Why are There So Few Afforestation and Reforestation Clean Development Mechanism Projects? *Land Use Policy*, 2010, vol. 27, iss. 3, pp. 880–887. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.12.002>

25. Yu X., Wang H. How Should the Center Lead China's Reforestation Efforts – Policy Making Games between Central and Local Governments. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, vol. 80, pp. 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.001>

26. Zhang D., Pearse P.H. The Influence of the Form of Tenure on Reforestation in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 98, iss. 3, pp. 239–250.

[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00085-6)

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

Научная статья

УДК 635.05:630.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-50-63

## Выращивание древесных пород в дендрарии Сибирской лесной опытной станции г. Тюмени

**А.В. Данчева**<sup>1</sup>✉, *д-р с.-х. наук, доц.*; ResearcherID: [AAG-7263-2019](https://orcid.org/0000-0002-5230-7288),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-7288>

**С.В. Залесов**<sup>2</sup>, *д-р с.-х. наук, проф.*; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

**Е.С. Папулов**<sup>3</sup>, *канд. с.-х. наук, директор*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6650-5857>

<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, ул. Володарского, д. 6, г. Тюмень, Россия, 625003; [a.v.dancheva@utmn.ru](mailto:a.v.dancheva@utmn.ru)✉

<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620110; [zalesov@usfeu.ru](mailto:zalesov@usfeu.ru)

<sup>3</sup>Сибирская лесная опытная станция, ул. Механизаторов, д. 5а, г. Тюмень, Россия, 425000; [erapulov@mail.ru](mailto:erapulov@mail.ru)

Поступила в редакцию 08.09.24 / Одобрена после рецензирования 26.11.24 / Принята к печати 27.11.24

**Аннотация.** Приведены результаты исследования состояния деревьев хвойных и лиственных пород, произрастающих в дендрарии Сибирской лесной опытной станции г. Тюмени, для возможного обоснования применения перспективных видов в целях улучшения породного состава лесных насаждений Тюменской области и повышения их устойчивости. Установлено, что по средним показателям санитарного и жизненного состояния, а также по средней относительной высоте большинство из обследованных интродуцентов хвойных древесных видов характеризуется как здоровые и устойчивые, лиственных древесных пород – ослабленные. Доля сильно ослабленных экземпляров у представителей хвойных и лиственных видов не превышает в среднем 20 и 30 % соответственно. Высокими показателями состояния и декоративных свойств у представителей хвойных древесных пород отличаются *Picea pungens* Engelm., *Larix sibirica* L., *Pinus sibirica* Du Tour, из лиственных древесных пород – *Betula pendula* Roth., *B. pubescens* Ehrh., *Populus balsamifera* L., *Tilia cordata* Mill., *Juglans mandshurica* Maxim. По основным таксационным показателям такие хвойные виды, как *Larix sibirica* Ledeb. и *Pinus sibirica* Du Tour, к возрасту 40–60 лет растут по Ia–I классам бонитета и формируют высокопродуктивные древостои. Данные виды можно рекомендовать для плантационного выращивания. *Picea obovata* Ledeb., *P. pungens* Engelm., *Thuja occidentalis* L., *Phellodendron amurense* Rupr., *Quercus robur* L. успешно приспосабливаются к условиям умеренно континентального климата лесостепной зоны Тюменской области. Это является подтверждением возможности их использования для озеленения г. Тюмени. Адаптирование отдельных представителей древесной растительности подзоны широколиственных лесов и их внедрение в лесные насаждения с целью создания сложных по строению и составу и за счет этого более устойчивых лесных насаждений в условиях меняющегося климата и экологической среды должны войти в число приоритетных задач ведения лесного хозяйства в защитных лесах Тюменской области.

**Ключевые слова:** дендрарий, древесные породы, интродуценты, подзона южной тайги, показатели состояния, Тюмень



**Для цитирования:** Данчева А.В., Залесов С.В., Папулов Е.С. Выращивание древесных пород в дендрарии Сибирской лесной опытной станции г. Тюмени // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 50–63. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-50-63>

Original article

## Cultivation of Tree Species in the Arboretum of the Siberian Forest Experimental Station in the City of Tyumen

**Anastasiya V. Dancheva**<sup>1</sup>✉, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAG-7263-2019](https://orcid.org/0000-0002-5230-7288), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5230-7288>

**Sergey V. Zalesov**<sup>2</sup>, *Doctor of Agriculture, Prof.;* ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

**Evgeniy S. Papulov**<sup>3</sup>, *Candidate of Agriculture, Director;*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6650-5857>

<sup>1</sup>University of Tyumen, ul. Volodarskogo, 6, Tyumen, 625003, Russian Federation; [a.v.dancheva@utmn.ru](mailto:a.v.dancheva@utmn.ru)✉

<sup>2</sup>Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620110, Russian Federation; [zalesov@usfeu.ru](mailto:zalesov@usfeu.ru)

<sup>3</sup>Siberian Forest Experimental Station, ul. Mekhanizatorov, 5a, Tyumen, 425000, Russian Federation; [epapulov@mail.ru](mailto:epapulov@mail.ru)

---

*Received on September 8, 2024 / Approved after reviewing on November 26, 2024 / Accepted on November 27, 2024*

---

**Abstract.** The article presents the results of a study on the state of coniferous and deciduous trees growing in the arboretum of the Siberian Forest Experimental Station in Tyumen to provide a possible justification for the use of promising species in order to improve the species composition of forest stands in the Tyumen Region and increase their sustainability. It has been established that according to the average indicators of sanitary and vital state, as well as the average relative height, the majority of the examined introduced coniferous tree species are characterized as healthy and stable, while deciduous tree species are weakened. The proportion of severely weakened specimens among coniferous and deciduous species does not exceed, on average, 20 and 30 %, respectively. Among coniferous tree species, *Picea pungens* Engelm., *Larix sibirica* L. and *Pinus sibirica* Du Tour are distinguished by high vital state indicators and decorative properties. Among deciduous tree species, these are *Betula pendula* Roth., *B. pubescens* Ehrh., *Populus balsamifera* L., *Tilia cordata* Mill. and *Juglans mandshurica* Maxim. According to the main inventory indicators, such coniferous species as *Larix sibirica* Ledeb and *Pinus sibirica* Du Tour, by the age of 40–60 years old, grow according to Ia–I quality classes and form highly productive stands. These species can be recommended for plantation cultivation. *Picea obovata* Ledeb, *P. pungens* Engelm., *Thuja occidentalis* L., *Phellodendron amurense* Rupr. and *Quercus robur* L. successfully adapt to the conditions of the temperate continental climate of the forest-steppe zone of the Tyumen Region. This confirms the possibility of their use for landscaping the city of Tyumen. The adaptation of individual representatives of woody vegetation of the broad-leaved forest subzone and their introduction into forest stands with the aim of creating forest stands that are complex in structure and composition and, as a result, more stable in the conditions of a changing climate and ecological environment should be among the priority tasks of forestry in the protective forests of the Tyumen Region.

**Keywords:** arboretum, tree species, introduced species, southern taiga subzone, vital state indicators, Tyumen

**For citation:** Dancheva A. V., Zalesov S. V., Papulov E. S. Cultivation of Tree Species in the Arboretum of the Siberian Forest Experimental Station in the City of Tyumen. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 50–63. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-50-63>

### *Введение*

Усиление антропогенного влияния, наблюдающееся в последние десятилетия на фоне меняющегося климата, приводит к существенной деградации лесных экосистем, сокращению биологического разнообразия и другим негативным последствиям [2, 16, 22]. Снижение устойчивости растительного покрова и изменение ареалов произрастания лесообразующих пород как в таежной зоне, так и в зоне широколиственных лесов сопровождается увеличением температуры воздуха [12, 20, 23].

Одним из направлений решения данной проблемы может быть внедрение в практику лесовыращивания интродуцентов, превосходящих аборигенные виды по устойчивости к изменению климатических условий и проявляющих большую толерантность к различным видам антропогенного воздействия [1, 11, 17].

Особую значимость как способ расширения видового разнообразия при озеленении городов и других населенных пунктов приобретают интродуценты. Среди положительных качеств интродуцентов следует отметить высокую декоративность многих из них, что дает возможность создавать при озеленении ландшафтные композиции круглогодичного действия [9, 19, 21]. Коллекции интродуцентов являются базой для публичного и профессионального образования, воспитания у людей навыков в отношении разумного использования растительных ресурсов, формирования экологической ответственности.

В ряде случаев интродуценты образуют более продуктивные фитоценозы по сравнению с аборигенными видами [5, 6, 8]. Расширение породного состава лесных насаждений за счет древесных интродуцентов способствует повышению устойчивости первых к природно-климатическим условиям и общей продуктивности за счет создания смешанных древостоев с использованием местных древесных пород, а также является перспективой для лесовосстановления.

Важное значение имеет оптимизация ассортимента важнейших древесных видов, привлекаемых для создания промышленных плантаций, защитных и озеленительных насаждений [3, 14, 15, 24]. Однако использование древесных интродуцентов должно базироваться на глубоких комплексных исследованиях их перспективности в конкретных экологических условиях. Применение непроверенных интродуцентов нередко приводит к их гибели и дискредитации самой идеи интродукции древесных растений.

Влияние изменения климата на устойчивость и продуктивность лесных насаждений в первую очередь проявляется на тех территориях, которые характеризуются жесткими природными условиями. К таким можно отнести южную часть Тюменской области, лесные насаждения здесь произрастают в условиях южной подзоны тайги (Западно-Сибирский подтаежно-лесостепной район лесостепной зоны). Оценка успешности адаптации

древесной растительности при меняющемся климате и обоснование применения устойчивых видов с перспективой внедрения в состав лесных насаждений устойчивых интродуцентов является актуальным вопросом.

В г. Тюмени одним из значимых объектов для выращивания и испытания интродуцентов в условиях южной подзоны тайги является дендрарий Сибирской лесной опытной станции (Сибирская ЛОС) –  $65^{\circ}45'49''$  с. ш.  $57^{\circ}16'04''$  в. д. Дендрарий заложен в 1972 г. на площади 2,0 га для изучения зональных особенностей древесной растительности и научного обоснования методов ведения лесного хозяйства в Западной Сибири (Тюменская область, Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа). На его территории были высажены более 70 видов древесных и кустарниковых растений местной флоры и экзотов, а также коллекция лекарственных растений.

Первоначально территория дендрария представляла собой пойму р. Туры с множеством небольших стариц и неглубоких протоков [18]. Высота над уровнем воды дренированных участков составляла не более 1 м. Последнее определило преобладание на землях дендрария дерново-подзолистых почв. Тип лесорастительных условий – С3. Дендрарий используется для проведения учебных практик студентов лесохозяйственного направления обучения Государственного аграрного университета и Тюменского колледжа производственных и социальных технологий.

Местоположение дендрария определяет специфические климатические условия. В целом климат может быть охарактеризован как континентальный умеренного пояса. На климатические показатели дендрария оказывает влияние равнинный рельеф местности. Территория дендрария и большая часть г. Тюмени характеризуются высотой над уровнем моря 100–150 м, абсолютные отметки участков местности на некотором расстоянии от дендрария достигают 300 м.

Поскольку район исследования находится в центре материка в юго-западной части Западно-Сибирской низменности, здесь четко проявляется влияние физических свойств суши на основные показатели климата. В частности, территория г. Тюмени летом сильно прогревается, а зимой, напротив, сильно остывает.

Не встречая препятствия на своем пути, арктические массы воздуха легко достигают района проведения научных работ и также легко вытесняются южными и юго-западными ветрами, повторяемость которых достигает 45 %. Указанное объясняет быструю смену погоды в г. Тюмени, при средней температуре за год  $+1,3^{\circ}\text{C}$ . Наиболее теплый месяц июль характеризуется средней температурой  $+18,3^{\circ}\text{C}$ . Максимально низкая температура зафиксирована в январе –  $-45^{\circ}\text{C}$ , при среднемесячной температуре  $-17^{\circ}\text{C}$ .

К важным для произрастания древесных растений факторам также относятся часто повторяющиеся поздние весенние и ранние осенние заморозки, продолжительность вегетационного периода 157 дней и годовая сумма осадков 452 мм.

Отмечаемое в последние десятилетия изменение климата, в т. ч. и в Тюменской области [10], влияющего не только на состояние окружающей среды, но и на лесные насаждения, является основанием для изучения и пересмотра с научным обоснованием перспективности использования различных древесных пород-интродуцентов в составе лесов защитного и экс-

плуатационного назначения для увеличения биоразнообразия и устойчивости последних.

Цель исследования – анализ состояния деревьев хвойных и лиственных пород в дендрарии филиала Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства – Сибирской ЛОС г. Тюмень и на основе полученных данных обоснование применения перспективных видов древесных растений для улучшения породного состава лесных насаждений и повышения их устойчивости.

#### Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили биогруппы деревьев хвойных и лиственных пород, произрастающие на территории дендрария Сибирской ЛОС. Всего обследовано 509 деревьев в рядовых посадках и в биогруппах. Из них 6 видов – это хвойные породы: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour), туя западная (*Thuja occidentalis* L.), ель колючая (*Picea pungens* Engelm.) – форма сизая; 9 видов – лиственные: дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), клен платановидный (*Acer platanoides* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), береза повислая (*B. pendula* Roth.), орех манчжурский (*Juglans mandshurica* Maxim.), яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh.), тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.), бархат амурский (*Phellodéndron amurénse* Rupr.). Также изучено состояние 9 деревьев сосны кедровой корейской, привитой на сосну обыкновенную.

Вблизи дендрария отсутствуют промышленные предприятия как источники загрязнения воздуха. С южной стороны дендрария на расстоянии 20 м находится автотрасса. Территория дендрария со стороны автотрассы огорожена 3 рядами чередующихся деревьев ели колючей и березы, которые не были использованы в нашем исследовании. Преобладание в течение года ветров западного направления снижает вероятность распространения выбросов в сторону территории дендрария.

Для оценки состояния деревьев и их совокупности применяли показатели санитарного и жизненного состояния, относительную высоту [4, 7]. Помимо этого, состояние деревьев определялось в соответствии с правилами санитарной безопасности в лесах (постановление Правительства РФ от 09.12.2020 № 2047).

Категории санитарного состояния хвойных пород включают в себя 5 градаций от 1 до 5, где 1 – здоровые деревья без признаков ослабления, а 5 – погибшие. Для каждого вида древесной растительности рассчитывалась средняя категория санитарного состояния (Кс) по количеству деревьев каждого вида: 1,00–1,50 – здоровый; 1,51–2,50 – ослабленный; 2,51–3,50 – сильно ослабленный; 3,51–4,60 – отмирающий, 4,61 и более – погибший.

Жизненное состояние деревьев определялось по состоянию ствола с учетом наличия повреждений различного происхождения и характеристики ассимиляционного аппарата с использованием шкалы: от 100 до 80 % – здоровое, от 79 до 50 % поврежденный древостой (ослабленный); от 49 до 20 % – сильно поврежденный (сильно ослабленный) и 19 % и ниже – полностью разрушенный.

Относительная высота рассчитывалась как отношение высоты дерева (см) к его диаметру на высоте 1, 3 м (см). При относительной высоте более 100 состояние деревьев оценивалось как ослабленное. Декоративность деревьев отдельных пород определялась по следующим параметрам: форма ствола и кроны, высота дерева, фактура кроны [13]. Основные таксационные показатели деревьев устанавливались с использованием стандартных методов [7].

Обработка полученных данных проведена в программе Excel с определением ошибки средних значений таксационных показателей и показателей состояния.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования приведены в таблице.

**Средние значения основных таксационных показателей  
и показатели состояния исследуемых биогрупп древесных пород**  
**The average values of the main inventory and vital state indicators  
of the studied tree species biogroups**

Древесная порода	Семейство	Количество, шт.	Возраст, лет	Средние				
				диаметр, см	высота, м	категория санитарного состояния	относительные	
			жизненное состояние, %				высота	
<i>Голосеменные (Pinophyta), хвойные (Pinopsida)</i>								
Ель сибирская ( <i>Picea obovata</i> Ledeb.)	Pinaceae Lindl.	5	56	24,2±0,9	19,3±0,6	2,6±0,2	73,0±2,0	80,1±2,1
Ель колючая – форма сизая ( <i>P. pungens</i> Engelm.)		5	30	11,0±0,7	8,3±0,4	1,4±0,3	81,0±1,9	76,5±5,7
Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> L.)		73	55	36,6±0,9	25,7±0,3	1,5±0,1	82,8±1,8	72,4±1,4
Сосна кедровая сибирская 1 ( <i>Pinus sibirica</i> Du Tour) (схема размещения 4×4 м)		88	43	19,3±0,6	12,4±0,2	1,4±0,1	77,1±1,4	66,7±1,1
Сосна кедровая сибирская 2 (схема размещения 2,5×1 м)		196	43	12,3±0,3	9,2±0,2	2,2±0,1	60,9±1,4	75,5±0,6
Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	Cupressaceae Bartl	6	–	11,4±0,6	8,0±0,3	1,8±0,3	75,8±3,0	73,0±2,4
Сосна обыкновенная ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)	Pinaceae Lindl.	21	56	23,6±1,2	19,8±0,7	1,5±0,1	84,3±2,7	85,9±2,3
Сосна кедровая корейская, привитая на сосну обыкновенную		9	25	13,0±0,6	12,4±0,9	1,6±0,2	74,5±1,6	95,4±4,7

Окончание таблицы

Древесная порода	Семейство	Количество, шт.	Возраст, лет	Средние				
				диаметр, см	высота, м	категория санитарного состояния	относительные	
							жизненное состояние, %	высота
<i>Покрывосеменные (Magnoliophyta), двудольные (Magnoliopsida)</i>								
Дуб черешчатый ( <i>Quercus robur</i> L.)	Fagaceae Dumort.	7	50	21,3±1,8	18,0±1,1	1,9±0,3	79,3±6,8	86,1±3,5
Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth.)	Betulaceae S.F. Gray	51	50	31,1±1,0	21,5±0,3	1,6±0,1	81,4±2,5	67,4±1,4
Береза пушистая ( <i>B. pubescens</i> Ehrh.)		8	55	31,0±3,8	22,5±0,9	1,4±0,1	83,8±3,7	74,5±5,5
Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borch.)	Rosaceae Juss.	1	–	21,5	22,5	1,0	90,0	104,7
Липа сердцевидная (мелколистная) ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	Tiliaceae Juss.	10	–	19,5±1,3	15,5±0,7	1,6±0,3	82,0±5,4	80,9±2,3
Клен платановидный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	Aceraceae Juss.	4	–	16,4±1,6	15,6±1,2	1,5±0,3	76,3±3,7	85,3±1,6
Орех маньчжурский ( <i>Juglans mandshurica</i> Maxim.)	Juglandaceae A. Rich. ex Kunth	3	45	19,4±0,6	17,0±1,0	2,3±0,8	70,0±1,4	87,8±2,3
Тополь бальзамический ( <i>Populus balsamifera</i> L.)	Salicaceae Mirb.	17	–	12,7±1,0	11,3±0,8	1,4±0,2	83,1±3,5	89,7±2,8
Бархат амурский ( <i>Phellodendron amurense</i> Rupr.)	Rutaceae	5	50	20,2±1,3	18,4±1,2	1,6±0,4	76,0±1,8	91,1±1,6

В ходе обследования было отмечено, что наибольшую по площади часть коллекции древесной растительности дендрария составляют посадки сосны кедровой сибирской и лиственницы. Сосна кедровая сибирская представлена культурами рядовой схемы посадки. Лиственница сибирская – рядовой посадкой вдоль аллеи с 2 ее сторон. Другие виды древесных пород – в основном групповыми посадками.

Половина обследованных видов хвойных и лиственных по средним показателям санитарного и жизненного состояния, а также относительной высоте характеризуются как здоровые или устойчивые.

Ранее проведенными нами исследованиями было доказано [9], что оценка жизненного состояния может отражать степень акклиматизации интродуцентов в новых лесорастительных условиях. Последнее свидетельствует о высокой значимости показателей жизненного состояния для переноса растений за пределы их естественного ареала.

Высокими показателями состояния среди хвойных древесных пород отличаются ель колючая – форма сизая, лиственница сибирская, сосны обычно-

венная, кедровая сибирская и кедровая корейская. Из лиственных древесных пород – береза повислая, береза пушистая, тополь бальзамический, яблоня ягодная, липа сердцевидная.

Большинство экземпляров елей и туи характеризуются высокой декоративностью и сохраняют привлекательный вид в течение всего года. Исследованные виды – *Picea obovata* Ledeb., *P. pungens* Engelm. и *Thuja occidentalis* L. имеют хорошие показатели санитарного и жизненного состояния, а также относительную высоту. Деревья характеризуются прямоствольностью и симметричностью сформированной кроны пирамидальной формы с ежегодно наблюдаемым линейным приростом, у большинства экземпляров отмечено плодоношение. По таксационным показателям ель колючая – форма сизая (*P. pungens* Engelm.) характеризуется III классом бонитета. Ель сибирская (*P. obovata* Ledeb.) – II.

По данным рис. 1, среди всех деревьев анализируемых древесных пород преобладают здоровые экземпляры. Ослабленные по состоянию особи в большинстве случаев характеризовались незначительным изменением цвета хвои в верхней части корны от темно-зеленого до желтого и красноватого оттенков. Последнее, возможно, связано с отмечаемыми в последние 2 года аномально высокими температурами воздуха в вегетационный период без достаточного количества осадков. Доля сильно ослабленных деревьев не превышает в среднем 20 %.

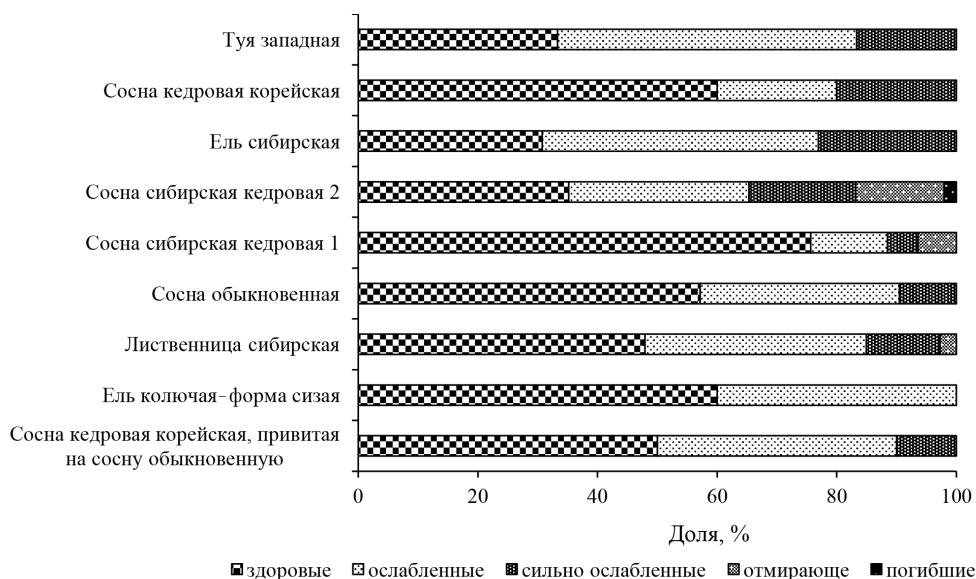


Рис. 1. Распределение деревьев хвойных пород по категориям санитарного состояния

Fig. 1. The distribution of coniferous trees by sanitary state categories

Приведенные данные указывают на успешную адаптационную реакцию к условиям умеренно континентального климата лесостепной зоны Тюменской области растений видов *Picea obovata* Ledeb., *P. pungens* Engelm. и *Thuja occidentalis* L. и являются подтверждением возможности их использования для озеленения г. Тюмени. Данные виды перспективны для выращивания и использования в целях озеленения и создания ландшафтных групп в зеленых зонах и лесопарках в южной подзоне тайги в лесостепной зоне Тюменской области. Можно рекомендовать высаживать перечисленные виды одиночно и группами

в аллейных посадках или в ландшафтных композициях в сочетании с другими видами древесно-кустарниковых пород в лесопарках и зеленых зонах населенных пунктов.

Отдельного внимания заслуживает анализ состояния такой хвойной породы, как лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), не являющейся интродуцентом для условий Тюменской области, но представляющей практический и научный интерес для данного региона. Эта древесная порода к возрасту 60 лет по средним таксационным показателям характеризуется I<sup>a</sup> классом бонитета. По средним показателям санитарного и жизненного состояния, а также по средней относительной высоте *L. sibirica* Ledeb. оценивается как здоровая. При этом количество сильно ослабленных экземпляров не превышает 15 %. Ствол деревьев – прямой, крона – симметрично развитая. У ослабленных особей отмечается незначительное пожелтение хвои. У единичных деревьев на стволах наблюдаются морозобойные трещины. Семеношение большинства представителей вида обильное. По данным проведенных исследований, *L. sibirica* Ledeb. можно рекомендовать для создания высокопродуктивных с хозяйственной точки зрения насаждений как чистого, так и смешанного состава.

Опыт выращивания сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в условиях дендрария Сибирской ЛОС показывает, что наибольшими таксационными показателями отличаются деревья, произрастающие в культурах со схемой размещения 4×4 м. В настоящее время к возрасту 43–45 лет *P. sibirica* Du Tour растет по III классу бонитета и характеризуется высокими средними показателями состояния, по значениям которых оценивается как здоровая и устойчивая. По количеству преобладают здоровые деревья – до 76 % от общего числа. Сильно ослабленных отмирающих деревьев не более 12 %. Отмечается незначительная доля поврежденных деревьев – до 5 % от общего количества. Фаутиность деревьев представлена в основном морозобойными трещинами и раздвоением кроны. Морозобойные трещины преобладают у экземпляров, произрастающих в крайних рядах, непосредственно примыкающих к аллее. Аналогичная ситуация наблюдается для деревьев лиственницы.

Культуры *P. sibirica* Du Tour, размещенные по схеме 2,5×1 м, отличаются меньшими таксационными показателями и к возрасту 43–45 лет характеризуются IV классом бонитета. По санитарному и жизненному состоянию древостой характеризуется как ослабленный. Это объясняется довольно большим количеством сильно ослабленных, отмирающих и погибших особей – в среднем 18, 15 и 2 % соответственно. Таким образом, наиболее устойчивыми, продуктивными и перспективными культурами *P. sibirica* Du Tour рядовой посадки является вариант со схемой размещения 4×4 м.

Большой интерес имеет опыт выращивания привитых экземпляров сосны корейской на сосну обыкновенную. Из 9 обследованных экземпляров 1 находится в угнетенном состоянии, ствол поврежден в нижней части. Остальные деревья характеризуются как хорошие, с успешной адаптацией к условиям окружающей среды. Крона сосен симметричная, хвоя густая, темно-зеленого цвета. Для получения достоверных данных о росте и развитии *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc. в условиях Тюменской области необходимо продолжить научные изыскания.

Из интродуцентов лиственных древесных пород в наибольшей степени заслуживают внимания дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), бархат амур-

ский (*Phellodéndron amurénse* Rupr.), орех маньчжурский (*Júglans mandshurica* Maxim.), состояние которых в целом характеризуется как ослабленное. При этом на долю здоровых экземпляров приходится 43, 40 и 33 % соответственно (рис. 2). Количество сильно ослабленных экземпляров не превышает 20–30 %. В большинстве случаев ослабление состояние объясняется повреждениями ствола морозобойными трещинами.

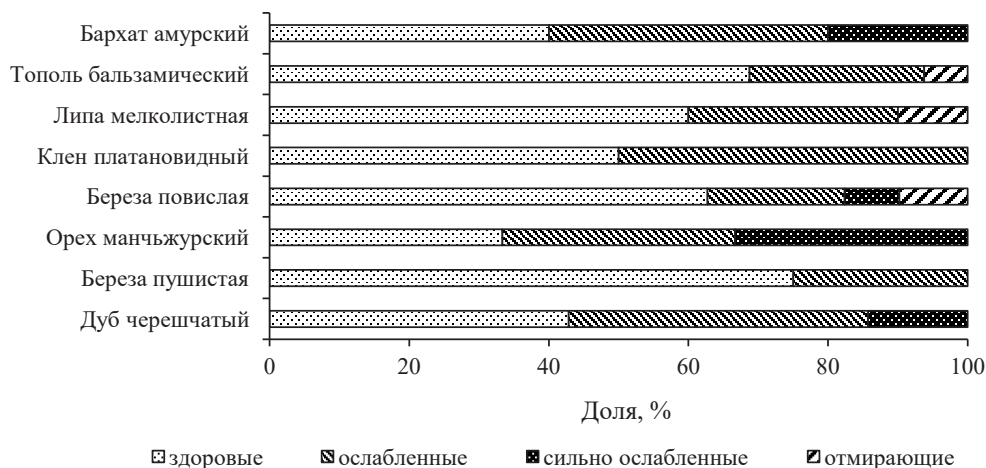


Рис. 2. Распределение деревьев лиственных пород по категориям санитарного состояния

Fig. 2. The distribution of deciduous trees by sanitary state categories

Довольно перспективными в выращивании и использовании в целях озеленения населенных пунктов лесостепной зоны Тюменской области являются *P. amurénse* Rupr., *Q. robur* L. Для более детального анализа роста и развития, а также получения достоверных данных об адаптации видов к природно-климатическим условиям Тюменской области необходимо углубить исследования.

Для изученных видов древесных пород-интродуцентов в условиях г. Тюмени представляет интерес оценка перспективности применения при создании лесных насаждений и ландшафтов рекреационного назначения.

Представители древесной растительности, благополучно адаптировавшиеся к условиям умеренных широт, могут быть внедрены в лесные насаждения с целью создания сложных по строению и составу, более устойчивых культур в условиях меняющегося климата и экологической среды. Достижение указанного результата должно стать одной из приоритетных задач ведения лесного хозяйства в защитных лесах Тюменской области.

### Выводы

1. Большой научный и практический интерес для лесовосстановления в условиях умеренно континентального климата лесостепной зоны Тюменской области из обследованных видов хвойных представляют *Picea obovata* Ledeb., *P. pungens* Engelm., *Thuja occidentalis* L., *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc., *Larix sibirica* Ledeb. и *Pinus sibirica* Du Tour; из лиственных – *Quercus robur* L., *Phellodéndron amurénse* Rupr., *Júglans mandshurica* Maxim.

2. По средним санитарному и жизненному состоянию, а также относительной высоте большинство обследованных интродуцентов хвойных древесных видов характеризуется как здоровые и устойчивые, лиственных древесных пород – ослабленные. Доля сильно ослабленных экземпляров у представителей хвойных и лиственных видов не превышает в среднем 20 и 30 % соответственно.

3. Обследованные интродуценты хвойных древесных видов характеризуются большей устойчивостью и более высокими показателями состояния по сравнению с интродуцентами лиственных видов.

4. По основным таксационным показателям такие хвойные виды, как *Larix sibirica* Ledeb. и *Pinus sibirica* Du Tour к возрасту 40–60 лет растут по I<sup>a</sup>–I классам бонитета и формируют высокопродуктивные древостои. Данные виды можно рекомендовать для плантационного выращивания.

5. *Picea obovata* Ledeb., *P. pungens* Engelm., *Thuja occidentalis* L., обладающие высокими устойчивостью и декоративностью, можно рекомендовать для озеленения населенных пунктов. Наибольшей декоративностью из сравниваемых интродуцентов характеризуется *P. obovata* Ledeb., *P. pungens* Engelm. с развитой архитектоникой и густой пирамидальной кроной.

6. В силу отличной адаптации к природно-климатическим условиям лесостепной зоны Тюменской области и высоких декоративных качеств *Quercus robur* L., *Phellodéndron amurénse* Rupr., *Júglans mandshurica* Maxim. следует предложить для использования в целях озеленения лесопарковых и зеленых зон населенных пунктов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова Ю.В., Петрик В.В. Развитие интродуцированных видов рода *Crataegus* L. в условиях Дендрологического сада имени И.М. Стратоновича (г. Архангельск) // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22, № 4. С. 99–108.

Aleksandrova Yu.V., Petrik V.V. Development of Introduced Genus *Crataegus* L. Species in the Conditions of the I.M. Stratonovich Dendrological Garden (The City of Arkhangel'sk). *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 99–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2018-4-99-108>

2. Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 73–85.

Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gayevskiy N.P. Stepwise Introduction of Dendroflora Species to the Northeastern Part of the Russian Plain (Review). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 3, pp. 73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-3-73-85>

3. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Кентбаева Б.А., Кентбаев Ю.Ж., Мамонов Е.И., Запольнов В.Е. Рост сеянцев ели Шренка (*Picea schrenkiana*) в условиях интродукции в Нижегородскую область // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2022. № 238. С. 67–87.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbayeva B.A., Kentbayev Y.Zh., Mamonov E.I., Zapolnov V.E. Growth of Seedlings of Schrenk Spruce (*Picea schrenkiana*) in the Conditions of Introduction to the Nizhny Novgorod Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2022, no. 238, pp. 67–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.67-87>

4. Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Осипенко Р.А. Основы фитомониторинга. 3-е изд., доп. и перераб. Екатеринбург: УГЛУ, 2020. 90 с.

Bun'kova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Osipenko R.A. *Fundamentals of Phytomonitoring*. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University Publ., 2020. 90 p. (In Russ.).

5. Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Кабонен А.В., Иоффе А.О. Оценка результатов интродукции сосны кедровой сибирской в условиях Южной Карелии // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 2(54). С. 6–14.

Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Kabonen A.V., Ioffe A.O. Evaluation of the Results of the Introduction of Siberian Cedar Pine in the Conditions of South Karelia. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2022, no. 2(54), pp. 6–14. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2022.2.6>

6. Григорьевская А.Я., Стародубцева Е.А., Лепешкина Л.А., Лисова О.С. Роль интродукции в формировании адвентивной фракции флоры природно-заповедного фонда Воронежской области // Лесотехн. журн. 2016. Т. 6, № 1(21). С. 7–20.

Grigorevskaya A.Ya., Starodubtseva E.A., Lepeshkina L.A., Lisova O.S. The Role of Introduction in Forming the Adventive Flora Fraction at Voronezh Region Protected Nature Reserve. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2016, vol. 6, no. 1(21), pp. 7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/18722>

7. Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 152 с.

Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Environmental Monitoring of Recreational Forest Stand Plantations*. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University Publ., 2015. 152 p. (In Russ.).

8. Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Васильева Н.Н. Представители семейства сосновые (*Pinaceae* Lindl.) североамериканской флоры в коллекции дендрологического сада ФБУ «СевНИИЛХ» // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 36–54.

Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Vasiljeva N.N. Representatives of the Pine Family (*Pinaceae* Lindl.) of the North American Flora in the Collection of the Dendrological Garden named after V.N. Nilov (NRIF). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 4, pp. 36–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-36-54>

9. Залесов С.В., Разжанов М.Р., Данчева А.В., Оплетев А.С. Опыт интродукции древесно-кустарниковых растений в лесном питомнике «Ак кайын» // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2016. Т. 20, № 2. С. 21–25.

Zalesov S.V., Razhanov M.P., Dancheva A.V., Opletaev A.S. Experience of Tree and Shrub Plants Introduction in Forest Nursery «Ak Kayin». *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2016, vol. 20, no. 2, pp. 21–25. (In Russ.).

10. Казанцева М.Н. Мониторинговые наблюдения за плодоношением дуба черешчатого *Quercus robur* L. в Затюменском лесопарке города Тюмени // Экосистемные услуги и менеджмент природных ресурсов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Тюмень, 2020. С. 40–42.

Kazantseva M.N. Monitoring Observations of the Fruiting of the English Oak *Quercus robur* L. in the Zatyumensky Forest Park of the City of Tyumen. *Ekosistemnye uslugi i menedzhment prirodnikh resursov*: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Tyumen, 2020, pp. 40–42. (In Russ.).

11. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Особенности роста *Pinus contorta* var. *latifolia* s.wats. на свалках бытовых отходов г. Архангельска // Наука северному региону: сб. науч. тр. Архангельск: АГТУ, 2006. Вып. 67. С. 162–170.

Kononov V.N., Zarubina L.V. Growth Features of *Pinus contorta* var. *latifolia* s.wats. at Municipal Waste Dumps in Arkhangelsk. *Nauka severnomu regionu*: Collection of Scientific Papers. Arkhangelsk, Arkhangelsk State University Publ., 2006, iss. 67, pp. 162–170. (In Russ.).

12. Константинов А.В., Сергиенко В.Г. Влияние изменений климата в голоцене на формирование разнообразия современных лесов и их трансформация к концу XXI века в Европейской России // Лесотехн. журн. 2016. Т. 6, № 3(23). С. 19–29.

Konstantinov A.V., Sergienko V.G. The Impact of Climate Change in Holocene on the Formation of Contemporary Forest Variety and Their Transformation by the End of the 21 Century in European Russia. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2016, vol. 6, no. 3(23), pp. 19–29. (In Russ.). <https://doi.org/12737/21676>

13. Коростелева М.В., Крекова Я.А., Залесов С.В., Оплетев А.С. Перспективные формы хвойных древесных растений для озеленения г. Екатеринбурга // Междунар. науч.-исследоват. журн. 2021. № 1-2(103). С. 124–130.

Korosteleva M.V., Krekova Ya.A., Zalesov S.V., Opletaev A.S. Promising Forms of Coniferous Woody Plants for Yekaterinburg Landscaping. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* = International Research Journal, 2021, no. 1-2(103), pp. 124–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.047>

14. Ляцева Л.В., Ляцев А.А., Штейнберг Ю.С. Зимостойкость хвойных растений в условиях северной лесостепи юга Тюменской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 49–61.

Lyasheva L.V., Lyashev A.A., Steinberg Yu.S. Winter Hardiness of Conifers in the Northern Forest Steppe Conditions of the South of the Tyumen Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 1, pp. 49–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-49-61>

15. Попова В.Т., Дорофеева В.Д., Чеkmенева Ю.В., Попова А.А., Шипицина В.А. Видовой состав дендрофлоры и состояние интродуцентов парка Победы г. Воронежа // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 2(34). С. 74–89.

Popova V.T., Dorofeeva V.D., Chekmeneva Yu.V., Popova A.A., Shipitsina V.A. Species Composition of Dendroflora and Condition of the Introduced Species in Voronezh Victory Park. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 2(34), pp. 74–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/9>

16. Ритберген-Маккракен Дж., Штейнлеггер Дж., Сох Ч.К. Леса высокой природоохранной ценности: концепция в теории и на практике / пер. Т. Яницкой. М.: Всемирн. фонд дикой природы, 2008. 24 с.

Rietbergen-McCracken J., Steindlegger G., Soh C. Koon. *High Conservation Value Forests: The Concept in Theory and Practice*. Trans. by T. Yanitskaya. Moscow, World Wide Fund for Nature, 2008. 24 p. (In Russ.).

17. Семенютина А.В., Соломенцева А.С. Рост и фенологическое развитие интродуцированных видов шиповников (*Rosa* L.) в условиях Волгоградской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 105–115.

Semenyutina A.V., Solomentseva A.S. Growth and Phenological Development of Introduced Wild Rose (*Rosa* L.) Species in Volgograd Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 5, pp. 105–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.105>

18. Сулова Н.Г. Лесоводственно-экологическое обоснование создания объекта рекреации на месте золоотвалов г. Тюмени: дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2013. 134 с.

Suslova N.G. *Forestry and Environmental Justification for the Creation of a Recreational Facility on the Site of Ash Dumps in Tyumen*: Cand. Agric. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2013. 134 p. (In Russ.).

19. Федорова Д.Г., Назарова Н.М., Кухлевская Ю.Ф. Модификация методики оценки жизнеспособности интродуцентов в соответствии с условиями сухостепной зоны Оренбургского Предуралья // Вестн. Нижнеуртв. гос. ун-та. 2021. № 2(54). С. 57–62.

Fedorova D.G., Nazarova N.M., Kuhlevskaya Yu.F. Modification of the Methodology for Assessing the Viability of Introduced Species in Accordance with the Conditions of Dry Steppe Zone of the Orenburg Region. *Vestnik Nizhneurtovskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Nizhneurtovsk State University, 2021, no. 2(54), pp. 57–62. (In Russ.).

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/21-2/07>

20. Atucha-Zamkova A.A., Steele K.A., Smith A.R. Modelling the Impact of Climate Change on the Occurrence of Frost Damage in Sitka Spruce (*Picea sitchensis*) in Great Britain. *Forestry*, 2021, vol. 94, iss. 5, pp. 664–676. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab020>

21. Lo Piccolo E., Landi M. Red-Leafed Species for Urban “Greening” in the Age of Global Climate Change. *Journal of Forestry Research*, 2021, vol. 32, pp. 151–159.

<https://doi.org/10.1007/s11676-020-01154-2>

22. Ordóñez Barona C., Wolf K., Kowalski J.M., Kendal D., Byrne J.A., Conway T.M. Diversity in Public Perceptions of Urban Forests and Urban Trees: A Critical Review. *Landscape and Urban Planning*, 2022, vol. 226, art. no. 104466.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104466>

23. Torssonen P., Strandman H., Kellomäki S., Kilpeläinen A., Jylhä K., Asikainen A., Peltola H. Do We Need to Adapt the Choice of Main Boreal Tree Species in Forest Regeneration under the Projected Climate Change? *Forestry*, 2015, vol. 88, iss. 5, pp. 564–572.

<https://doi.org/10.1093/forestry/cpv023>

24. Fischer A.P. Forest Landscapes as Social-Ecological Systems and Implications for Management. *Landscape and Urban Planning*, 2018, vol. 177, pp. 138–147.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.001>

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

Научная статья

УДК 582.475.4:631.524.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-64-77

## Динамика фотосинтетического пигментного комплекса сосны обыкновенной в связи с климатическими факторами на Европейском Севере

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

**Н.А. Прожерина**, *канд. биол. наук, ст. науч. сотр.*; ResearcherID: [A-5917-2013](https://orcid.org/0000-0002-5067-7007),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-7007>

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

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

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; [tarkse@yandex.ru](mailto:tarkse@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [pronad1@yandex.ru](mailto:pronad1@yandex.ru), [aviatorov8@mail.ru](mailto:aviatorov8@mail.ru), [julja-a30@rambler.ru](mailto:julja-a30@rambler.ru)

---

Поступила в редакцию 05.10.24 / Одобрена после рецензирования 26.12.24 / Принята к печати 27.12.24

---

**Аннотация.** Более высокую чувствительность к климатическим изменениям среди древесных пород имеют хвойные, в частности, сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Целью работы является оценка динамики содержания фотосинтетических пигментов в хвое сосны обыкновенной в связи с изменением климатических факторов в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги. Исследование проводили в кустарничково-сфагновых сосняках на болотных торфяных почвах в устье р. Северной Двины. На постоянных пробных площадях в период с 1998 по 2019 гг. у 20–50 деревьев сосны отбирали образцы 1-летней хвои, у которой фотометрическим методом определяли содержание хлорофиллов и каротиноидов. Изучение сезонной динамики показателей фотосинтетического пигментного комплекса хвои сосны, проведенное в 2013–2016 гг., показало, что содержание зеленых пигментов начинает существенно снижаться только при наступлении морозов в ноябре. Положительная температура в сентябре–октябре способствует синтезу хлорофиллов, что может негативно сказаться на закаливании деревьев перед зимовкой. В осенне-зимний период наблюдается активное накопление в хвое каротиноидов, что следует рассматривать как адаптивную реакцию, направленную на развитие устойчивости фотосинтетического аппарата сосны к меняющимся условиям среды. В мае–июне 1998–2019 гг. установлено сходство в динамике среднемесячной температуры воздуха и содержания хлорофилла *a* и каротиноидов в хвое. Для этого промежутка времени отмечена положительная корреляция концентрации хлорофилла *a* с температурой воздуха. Таким образом, в начале и в период активной вегетации в условиях северной тайги положительная температура оказывает стимулирующее действие на формирование фотосинтезирующего аппарата хвои сосны. В условиях избыточного увлажнения за 20 лет количество осадков не оказало значительного влияния на содержание фотосинтетических пигментов в хвое сосны.

**Ключевые слова:** *Pinus sylvestris* L., динамика фотосинтетических пигментов, климатические факторы, температура, количество осадков, избыточное увлажнение

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦ комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН (проект № FUUW-2025-0003, № ГР 125021902596-8).

**Для цитирования:** Тарханов С.Н., Прожерина Н.А., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Динамика фотосинтетического пигментного комплекса сосны обыкновенной в связи с климатическими факторами на Европейском Севере // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 64–77. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-64-77>

Original article

## Dynamics of the Photosynthetic Pigment Complex of Scots Pine in Relation to Climatic Factors in the European North

**Sergei N. Tarkhanov**<sup>✉</sup>, Doctor of Biology, Laboratory Chief, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

**Nadezhda A. Prozherina**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [A-5917-2013](https://orcid.org/0000-0002-5067-7007), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-7007>

**Ekaterina A. Pinaevskaya**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [ABB-6293-2020](https://orcid.org/0000-0003-1877-1412), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-1412>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-8979>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Nikolskiy, 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; [tarkse@yandex.ru](mailto:tarkse@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [pronad1@yandex.ru](mailto:pronad1@yandex.ru), [aviatorov8@mail.ru](mailto:aviatorov8@mail.ru), [julja-a30@rambler.ru](mailto:julja-a30@rambler.ru)

---

Received on October 5, 2024 / Approved after reviewing on December 26, 2024 / Accepted on December 27, 2024

---

**Abstract.** Among tree species, conifers, in particular Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) have a higher sensitivity to climate change. The aim of the work has been to assess the dynamics of photosynthetic pigments in connection with changes in climatic factors under conditions of constant excessive moistening in the soils of the northern taiga. The research has been conducted in dwarf shrub-shpagnun pine forests on bog peat soils at the mouth of the Northern Dvina River. In the period from 1998 to 2019, samples of 1-year-old needles have been collected from 20–50 pine trees in permanent sample plots, and the chlorophyll and carotenoid content has been determined using the photometric method. A study of the seasonal dynamics of the photosynthetic pigment complex of pine needles conducted in 2013–2016 has shown that the content of green pigments begins to decrease significantly only with the onset of frost in November. The positive temperature in September and October promotes the synthesis of chlorophylls, which can negatively affect the process of hardening trees before overwintering. In the autumn-winter period, there is an active accumulation of carotenoids in the needles, which should be considered as an adaptive response aimed at developing the resistance of the pine photosynthetic apparatus to changing environmental conditions. In May–June 1998–2019, a similarity has been found in the dynamics of the average monthly air temperature and the content of chlorophyll *a* and carotenoids in the needles. During this period, a positive correlation has been observed between the concentration of chlorophyll *a* and the air temperature. Thus, at the beginning and during the active growing season in the northern taiga, positive temperatures have a stimulating effect on the formation of the photosynthetic apparatus of pine needles. In conditions of excessive moistening over a 20-year period, the amount

of precipitation has not had a significant effect on the content of photosynthetic pigments in pine needles.

**Keywords:** *Pinus sylvestris* L., dynamics of photosynthetic pigments, climatic factors, temperature, amount of precipitation, excessive moistening

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the state assignment for the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project no. FUUW-2025-0003, no. GR 125021902596-8).

**For citation:** Tarkhanov S.N., Prozherina N.A., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Dynamics of the Photosynthetic Pigment Complex of Scots Pine in Relation to Climatic Factors in the European North. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 64–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-64-77>

### Введение

Изменение климата оказывает влияние на лесные экосистемы, что обуславливает необходимость разработки стратегии ведения лесного хозяйства в новых условиях. Согласно расчетам, выполненным для Пятого оценочного доклада МГЭИК [17], в XXI в. в северных широтах прогнозируется наиболее сильное потепление, связанное с увеличением осадков. Изменение глобальной приземной температуры в конце XXI в., вероятно, превысит 1,5–2,0 °C по сравнению с периодом 1850–1900 гг. Потепление климата на территории России более значительно, чем глобальное. По сведениям Росгидромета [3], средний для России линейный тренд к повышению температуры в 1976–2012 гг. составил 0,043 °C в год. Наиболее быстро (0,052 °C в год) температура растет на европейской территории России. Более выраженное потепление наблюдается в зимний и весенний периоды – до 0,4 °C за 10 лет (зимой – над континентом, весной – в высоких широтах) [10]. В Архангельской области с 1966 г. наблюдается устойчивое повышение средней температуры воздуха [5]. В целом по стране тренд годовых сумм осадков положительный (0,8 мм в месяц за 10 лет). Наименьшее увеличение суммы годовых осадков отмечается в европейской части, Приамурье и Приморье (на 0,5 мм в месяц за 10 лет). В этих регионах осадки явно увеличиваются лишь весной (на 1,5 мм в месяц), а летом – уменьшаются (на 0,8 мм в месяц за 10 лет) [8]. Данные Росгидромета показывают, что на севере страны ожидается повышение количества осадков как в зимний, так и в летний периоды [6]. По прогнозу специалистов в области глобальной экологии, Европейский Север (Баренц-регион) может оказаться эпицентром климатических изменений. Зона гидротермического оптимума сместится к северу. Анализ температурных данных за 1814–2014 гг., полученных метеостанцией «Архангельск», показал тренд на увеличение среднегодовой температуры воздуха с 0,4 °C в XIX в. до 1,0 °C в XX в. При этом наблюдался рост температуры по всем сезонам.

Древесные породы имеют различную отзывчивость на изменения факторов окружающей среды. Многие авторы приходят к выводу о большей чувствительности хвойных деревьев к климатическим изменениям по сравнению с лиственными [19, 28]. При оценке влияния климатических изменений на древесную растительность рассматриваются как краткосрочные, так и долгосрочные эффекты [24, 25]. Долгосрочные отклики в лесных экосистемах связаны не только с термическими изменениями, но и с изменениями режима увлажнения, инсоляции, распространения патогенов и другими факторами. Долгосрочные

изменения в лесных экосистемах могут сопровождаться физиологическими и генетическими перераспределениями у всех видов [24] и растянуться по времени на несколько поколений [15, 26, 29]. В связи с генетическими изменениями виды должны пройти «эволюционную адаптацию» [20]. При устойчивом потеплении следует ожидать повышения продуктивности лесов за счет сдвигов в продолжительности вегетационного периода и сроков роста деревьев, усиления их фотосинтетической активности [15, 25], с другой стороны, возможно снижение производительности в результате уменьшения уровня осадков и возникновения засухи [22].

Содержание и состав фотосинтетического пигментного комплекса являются показателями основного метаболизма, от которого зависит устойчивость растений к факторам внешней среды. Их динамика определяется генетическими свойствами и экологическими факторами, в т. ч. климатическими. Географическое положение и климат района влияют на соотношение форм фотосинтетических пигментов растений. Варьирование структурно-функциональных параметров фотосинтетического аппарата растений связано с их адаптацией к климату [30].

Зеленые пигменты и каротиноиды обуславливают работу фотосинтезирующего аппарата растений. Их содержание и соотношение в хвое коррелируют с резистентностью и могут выступать индикатором устойчивости к неблагоприятным факторам среды [7]. У хвойных пород наблюдается сезонная реорганизация фотосинтезирующей системы хлоропластов, количественные и качественные изменения пигментного фонда хвои [9, 14, 23, 27]. Известно, что адаптация пигментного аппарата происходит путем трансформации светособирающего пигментного комплекса [21]. В условиях высокой инсоляции часто наблюдается повышение доли каротиноидов, выполняющих в данных условиях функцию защиты от фотоингибирования [18]. Поскольку считается, что хлорофилл *b* находится в пигмент-белковых светособирающих комплексах фотосистемы II, то изменение соотношения хлорофиллов *a/b* может быть связано с изменением ее функционирования [16]. Во влажных местообитаниях, где корневые системы древесных растений затоплены поверхностными водами с низким содержанием кислорода, листья имеют значительно меньше пластидных пигментов и более низкую физиологическую активность, чем в лесорастительных условиях с более дренированными почвами [1].

Цель исследования – оценка динамики содержания фотосинтетических пигментов в хвое сосны обыкновенной в условиях постоянного избыточного увлажнения почв северной тайги в связи с изменением климатических факторов.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования была сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), произрастающая в условиях постоянного избыточного увлажнения на верхних торфяных почвах северной тайги в устье р. Северной Двины (рис. 1).

В период с 1998 по 2019 гг. на постоянных пробных площадях в сосняках кустарничково-сфагновых у 20–50 деревьев сосны возрастом 80–100 лет отбирали образцы хвои (не менее 20 1-летних побегов с 1 дерева). В лабораторных условиях в 1-летней хвое фотометрически устанавливали содержание фотосинтетических пигментов [11]. Измеряли оптическую плотность раствора для определения концентрации: хлорофилла *a* – при длине волны 665 нм, хло-

рофилла  $b$  – 649 нм, каротиноидов – 440,5 нм, соответствующих максимуму поглощения пигментами в растворителе (96%-м этаноле). Рассчитывали концентрацию пигментов в вытяжке по формулам [11]. Климатические факторы – температуру воздуха и количество осадков оценивали по данным метеостанции «Архангельск», находящимся в открытом доступе на сайтах Северо-Евразийского климатического центра [13] и «Гисметео» [4].

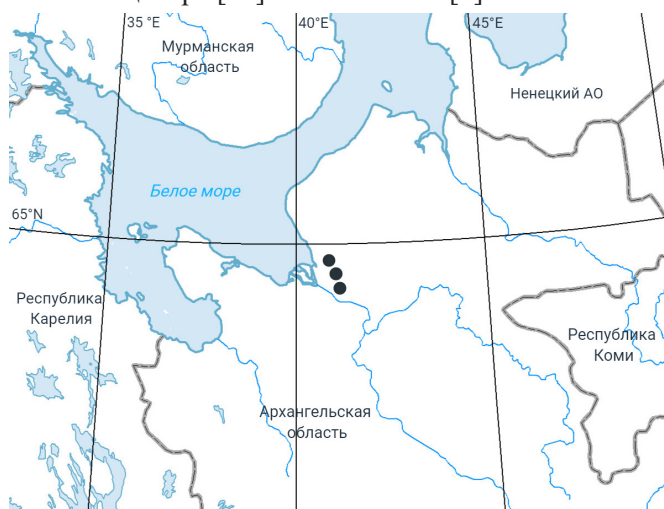
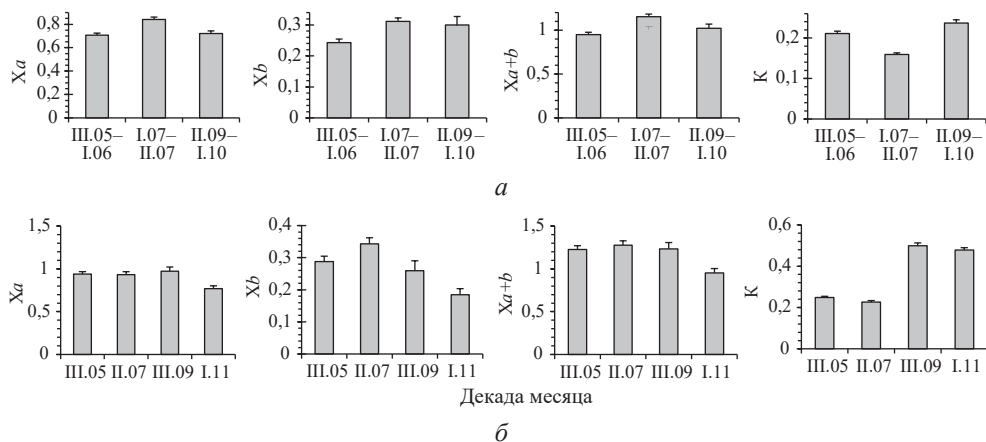


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей

Fig. 1. The schematic map showing the location of sample plots

### Результаты исследования и их обсуждение

Согласно полученным результатам (рис. 2), в 2013 г. наблюдались существенные различия между содержанием в 1-летней хвое хлорофилла  $a$  ( $0,84 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ), хлорофилла  $b$  ( $0,31 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) и суммарным содержанием хлорофиллов  $a$  и  $b$  ( $1,15 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) в июле и их концентрацией в конце мая – начале июня ( $0,71$ ,  $0,24$  и  $0,95 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$  соответственно), а также содержанием хлорофилла  $a$  ( $0,72 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) в конце сентября – начале октября. Содержание каротиноидов существенно увеличилось осенью ( $0,24 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) по сравнению с весенне-летним периодом ( $0,16$ – $0,21 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ). Различия показателей достоверны на 5%-м уровне значимости (табл. 1).



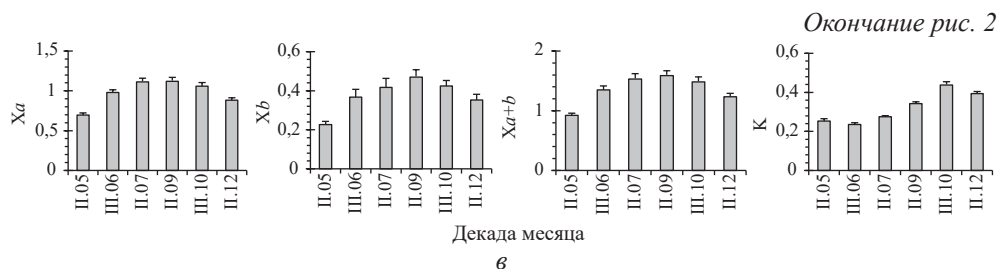


Рис. 2. Сезонная динамика показателей фотосинтетического пигментного комплекса (среднее значение с ошибкой по 2 декадам) 1-летней хвои сосны: *a* – 2013 г.; *b* – 2015 г.; *в* – 2016 г. *Xa*, *Xb*, *K* – содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов соответственно,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  сухой массы

Fig. 2. The seasonal dynamics of the photosynthetic pigment complex indices (average value with error over 2 decades) of 1-year pine needles: *a* – 2013; *b* – 2015; *в* – 2016. *Xa*, *Xb*, *K* – content of chlorophylls *a*, *b* and carotenoids, respectively,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  dry weight

Таблица 1

**Достоверность различий показателей фотосинтетических пигментов  
в 1-летней хвое сосны ( $t_{0,05} = 2,10$ ;  $q_{s0,05} = 2,10$ )  
The reliability of differences in photosynthetic pigment indices  
in 1-year-old pine needles ( $t_{0,05} = 2.10$ ;  $q_{s0,05} = 2.10$ )**

Год	Сравниваемые периоды (декада месяца)	Показатель	<i>Xa</i>	<i>Xb</i>	<i>Xa+b</i>	<i>K</i>
2013	III.05–I.06	t	<b>5,01</b>	<b>4,25</b>	<b>5,04</b>	<b>7,03</b>
	I.07–II.07	$q_s$	<b>3,84</b>	<b>3,32</b>	<b>3,96</b>	<b>5,42</b>
	III.05–I.06	t	0,47	1,82	1,30	<b>2,71</b>
	III.09–I.10	$q_s$	0,02	1,58	0,86	<b>2,32</b>
	I.07–II.07	t	<b>3,94</b>	0,35	<b>2,31</b>	<b>9,07</b>
	III.09–I.10	$q_s$	<b>3,30</b>	0,27	2,06	<b>8,41</b>
2015	III.05	t	0,14	<b>2,13</b>	0,73	<b>2,23</b>
	II.07	$q_s$	0,12	1,76	0,59	1,97
	III.05	t	0,60	0,81	0,06	<b>17,28</b>
	III.09	$q_s$	0,48	0,66	0,05	<b>15,02</b>
	III.05	t	<b>3,87</b>	<b>4,10</b>	<b>4,10</b>	<b>18,05</b>
	I.11	$q_s$	<b>3,10</b>	<b>3,63</b>	<b>3,39</b>	<b>14,64</b>
	II.07	t	0,67	<b>2,29</b>	0,48	<b>17,81</b>
	III.09	$q_s$	0,55	1,95	0,39	<b>15,22</b>
	II.07	t	<b>3,43</b>	<b>5,87</b>	<b>4,45</b>	<b>18,46</b>
	I.11	$q_s$	<b>2,76</b>	<b>5,08</b>	<b>3,66</b>	<b>16,31</b>
	III.09	t	<b>3,44</b>	2,07	<b>3,08</b>	1,22
	I.11	$q_s$	<b>2,70</b>	1,82	<b>2,48</b>	1,08
2016	II.05	t	<b>6,77</b>	<b>3,26</b>	<b>5,49</b>	1,10
	III.06	$q_s$	<b>6,38</b>	<b>3,53</b>	<b>5,73</b>	0,87
	II.05	t	<b>9,19</b>	<b>3,95</b>	<b>7,02</b>	1,59
	II.07	$q_s$	<b>8,62</b>	<b>3,48</b>	<b>6,30</b>	1,53
	II.05	t	<b>8,80</b>	<b>6,41</b>	<b>8,55</b>	<b>5,99</b>
	II.09	$q_s$	<b>8,25</b>	<b>5,60</b>	<b>7,75</b>	<b>5,13</b>
	II.05	t	<b>6,98</b>	<b>5,99</b>	<b>6,98</b>	<b>10,19</b>
	III.10	$q_s$	<b>7,86</b>	<b>6,52</b>	<b>7,98</b>	<b>10,82</b>
II.05	t	<b>4,47</b>	<b>3,72</b>	<b>4,49</b>	<b>8,86</b>	

Окончание табл. 1

Год	Сравниваемые периоды (декада месяца)	Показатель	Xa	Xb	Xa+b	K
2016	П.12	q <sub>s</sub>	<b>4,09</b>	<b>3,23</b>	<b>3,99</b>	<b>7,53</b>
	Ш.06	t	<b>2,70</b>	0,83	1,76	<b>3,77</b>
	П.07	q <sub>s</sub>	<b>2,85</b>	0,88	1,96	<b>2,95</b>
	Ш.06	t	<b>2,69</b>	1,94	<b>2,50</b>	<b>9,00</b>
	П.09	q <sub>s</sub>	<b>2,65</b>	<b>2,23</b>	<b>2,63</b>	<b>7,92</b>
	Ш.06	t	1,43	1,15	1,38	<b>12,96</b>
	Ш.10	q <sub>s</sub>	1,09	1,02	1,13	<b>14,13</b>
	Ш.06	t	<b>2,19</b>	0,30	1,28	<b>12,18</b>
	П.12	q <sub>s</sub>	1,76	0,29	1,06	<b>9,90</b>
	П.07	t	0,13	0,91	0,56	<b>6,53</b>
	П.09	q <sub>s</sub>	0,27	0,78	0,57	<b>5,73</b>
	П.07	t	0,92	0,11	0,45	<b>11,23</b>
	Ш.10	q <sub>s</sub>	<b>2,13</b>	0,15	1,09	<b>12,38</b>
	П.07	t	<b>4,78</b>	1,21	<b>3,04</b>	<b>10,21</b>
	П.12	q <sub>s</sub>	<b>4,36</b>	1,32	<b>3,05</b>	<b>8,62</b>
	П.09	t	1,00	1,02	1,07	<b>5,99</b>
	Ш.10	q <sub>s</sub>	<b>2,19</b>	1,43	1,98	<b>5,88</b>
	П.09	t	<b>4,66</b>	<b>2,59</b>	<b>3,95</b>	<b>3,87</b>
П.12	q <sub>s</sub>	<b>3,80</b>	<b>2,38</b>	<b>3,32</b>	<b>3,07</b>	
Ш.10	t	<b>3,25</b>	1,74	<b>2,72</b>	<b>2,60</b>	
П.12	q <sub>s</sub>	<b>3,79</b>	1,51	<b>2,75</b>	<b>2,24</b>	

Примечание: t – критерий Стьюдента;  $t_{0,05} - t$  на 5%-м уровне значимости; q<sub>s</sub> – критерий Тьюки;  $q_{s0,05} - q_s$  на 5%-м уровне значимости; Xa, Xb, K – содержание хлорофиллов a, b и каротиноидов соответственно, мг·г<sup>-1</sup> сухой массы. Полужирным шрифтом выделены достоверные различия показателей.

В июле 2015 г. содержание хлорофилла b (0,34 мг·г<sup>-1</sup>) в 1-летней хвое существенно превышало этот показатель осенью (0,26 мг·г<sup>-1</sup>). Количество хлорофилла a (0,77 мг·г<sup>-1</sup>) и сумма хлорофиллов a и b (0,95 мг·г<sup>-1</sup>) значительно снизились в начале ноября, когда установилась отрицательная температура воздуха (в среднем за месяц этот показатель в 2015 г. составил –3,4 °С). Различия показателей ноября с концом мая – началом июня (хлорофилл a – 0,94 мг·г<sup>-1</sup>; сумма хлорофиллов a и b – 1,23 мг·г<sup>-1</sup>), а также с июлем (хлорофилл a – 0,93 мг·г<sup>-1</sup>; хлорофиллов a и b – 1,28 мг·г<sup>-1</sup>) и концом сентября (хлорофилл a – 0,97 мг·г<sup>-1</sup>; сумма хлорофиллов a и b – 1,23 мг·г<sup>-1</sup>) достоверны. Концентрация каротиноидов осенью 2015 г. существенно увеличилась (0,50 мг·г<sup>-1</sup>) по сравнению с весенне-летним периодом (0,23–0,25 мг·г<sup>-1</sup>). Минимальный уровень каротиноидов наблюдался в июле (0,23 мг·г<sup>-1</sup>).

В мае 2016 г. содержание хлорофиллов a (0,70 мг·г<sup>-1</sup>), b (0,23 мг·г<sup>-1</sup>), суммы хлорофиллов a и b (0,92 мг·г<sup>-1</sup>) в 1-летней хвое было значительно меньше по сравнению с летним (хлорофилл a – 0,98–1,11 мг·г<sup>-1</sup>; b – 0,37–0,42 мг·г<sup>-1</sup>; хлорофиллов a и b – 1,35–1,53 мг·г<sup>-1</sup>), осенним (хлорофилл a – 1,06–1,12 мг·г<sup>-1</sup>; хлорофилл b – 0,42–0,47 мг·г<sup>-1</sup>; сумма хлорофиллов a и b – 1,48–1,59 мг·г<sup>-1</sup>) периодами и началом зимы (хлорофилл a – 0,88 мг·г<sup>-1</sup>; хлорофилл b – 0,35 мг·г<sup>-1</sup>; сумма хлорофиллов a и b – 1,23 мг·г<sup>-1</sup>). Различия показателей достоверны на 5%-м уровне значимости.

В сосняках сфагновых и кустарничково-сфагновых на верховых торфяных почвах северной тайги в мае–июне почвенно-грунтовые воды обычно близко к поверхности, что создает особенно неблагоприятные условия для корней древесных растений. В этих условиях в почвенной воде содержится менее  $2 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  кислорода. Это отрицательно сказывается на синтезе фотосинтетических пигментов в хвое сосны [2]. В декабре, с наступлением морозов (средняя за этот месяц температура воздуха в 2016 г. составила  $-7,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) содержание хлорофилла *a* ( $0,88 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) и суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b* ( $1,23 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) существенно понизилось по сравнению с летним (хлорофилл *a* –  $1,11 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ; сумма хлорофиллов *a* и *b* –  $1,53 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) и осенним (хлорофилл *a* –  $1,06$ – $1,12 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ; сумма хлорофиллов *a* и *b* –  $1,48$ – $1,59 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) периодами. Исключением стало незначительное снижение суммарного содержания хлорофиллов *a* и *b* в декабре сопоставительно с июнем ( $1,35 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ). Увеличение количества в хвое сосны зеленых пигментов в условиях избыточного увлажнения почв в северной и средней тайге Европейского Севера России главным образом обусловлено повышением температуры воздуха и почвы в летний период [12, 27]. По сведениям [2], в сосняках кустарничково-сфагновых северной и средней тайги Европейского Севера России максимум фотосинтетических пигментов в хвое сосны наблюдается в конце лета – начале осени. Зимой и весной хлорофилла (особенно хлорофилла *b*) в хвое сосны в этих условиях меньше. Содержание каротиноидов в осенне-зимний период ( $0,34$ – $0,44 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) оказалось существенно больше, чем в весенне-летний ( $0,24$ – $0,27 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ). Осеннее увеличение уровня каротиноидов в хвое связано со снижением температуры воздуха, повышением уровня почвенно-грунтовых вод, способствующим корневой гипоксии и гипотермии [27]. Влияние фактора «сезон» на содержание хлорофиллов и каротиноидов в 1-летней хвое сосны в разные годы подтверждается 1-факторным дисперсионным анализом (табл. 2).

Таблица 2

**Влияния фактора «сезон» на содержание фотосинтетических пигментов в 1-летней хвое сосны ( $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$  сухой массы) по результатам 1-факторного дисперсионного анализа**  
**The effects of the “season” factor on the content of photosynthetic pigments in 1-year-old pine needles ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  dry weight) based on the results of a one-way analysis of variance**

Показатель	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Сумма хлорофиллов <i>a</i> и <i>b</i>	Каротиноиды
<i>2013 г. (<math>F_{0,05} = 3,06</math>)</i>				
F	13,67	4,03	8,81	43,73
$\eta^2 \pm S_{\eta^2}$	$0,164 \pm 0,012$	$0,055 \pm 0,014$	$0,113 \pm 0,013$	$0,386 \pm 0,009$
<i>2015 г. (<math>F_{0,05} = 2,72</math>)</i>				
F	6,20	8,84	6,86	213,78
$\eta^2 \pm S_{\eta^2}$	$0,197 \pm 0,032$	$0,259 \pm 0,029$	$0,213 \pm 0,031$	$0,894 \pm 0,04$
<i>2016 г. (<math>F_{0,05} = 2,29</math>)</i>				
F	20,90	6,38	14,56	65,42
$\eta^2 \pm S_{\eta^2}$	$0,480 \pm 0,023$	$0,220 \pm 0,035$	$0,392 \pm 0,027$	$0,743 \pm 0,011$

Примечание: F – критерий Фишера;  $F_{0,05}$  – критерий F на 5%-м уровне значимости;  $\eta^2 \pm S_{\eta^2}$  – влияние фактора с ошибкой.

Если рассматривать сезонную динамику содержания фотосинтетических пигментов в 1-летней хвое сосны в течение 3 лет, можно отметить следующее. При повышенной температуре (по сравнению со среднемноголетней) осенью, о чем свидетельствуют данные табл. 3, суммарное содержание зеленых пигментов существенно не различается по сравнению с летним периодом. Концентрация хлорофиллов начинает существенно снижаться только в ноябре, когда наступают морозы. Теплая осень способствует синтезу зеленых пигментов в хвое, однако это может отрицательно сказаться на процессах закаливания при подготовке сосны к перезимовке. Анализ сезонной динамики концентрации каротиноидов в 2013 и 2015–2016 гг. свидетельствует о значительном увеличении их содержания в осенний и зимний периоды по сравнению с весенне-летним ( $t = 2,71-18,46$ ;  $t_{0,05} = 2,01-2,09$ ). Повышение уровня каротиноидов осенью–зимой направлено на усиление их защитной роли и развитие устойчивости фотосинтетического аппарата сосны к неблагоприятным условиям среды.

Таблица 3

**Метеорологические показатели (в сентябре–октябре)  
района исследования (метеостанция «Архангельск»)  
The meteorological indicators (in September–October)  
of the study area (“Arkhangelsk” weather station)**

Год	Температура воздуха, °С	Сумма осадков, мм
<i>2013 г.</i>		
Сентябрь	8,4/7,9	14/69
Октябрь	2,6/1,5	102/63
<i>2015 г.</i>		
Сентябрь	10,6/7,9	71/69
Октябрь	3,1/1,5	52/63
<i>2016 г.</i>		
Сентябрь	9,0/7,9	41/69
Октябрь	3,0/1,5	22/63

Примечание: В числителе среднемесячная температура воздуха и месячная сумма осадков соответственно; в знаменателе – среднемноголетние значения.

Анализ динамики содержания фотосинтетических пигментов в 1-летней хвое и основных метеорологических параметров в начале и в период активной вегетации в мае–июне по годам (1998–2019 гг.) показал следующее. Выявлено определенное сходство в динамике средней температуры воздуха и содержания хлорофилла *a* и каротиноидов в хвое сосны в мае–июне на протяжении 2 десятилетий, однако в отношении концентрации хлорофилла *b* этого отметить нельзя (рис. 3).

Между средней температурой воздуха и содержанием хлорофилла *a* в 1-летней хвое в мае–июне текущего года установлена слабая положительная (коэффициент корреляции равен 0,49), но достоверная ( $t = 2,23$ ;  $t_{0,05} = 2,12$ ) связь. Коэффициент детерминации линейной регрессии ( $R^2$ ) составляет 0,245 (рис. 4). В динамике количества осадков и содержания пигментов в хвое в мае–июне схождения не наблюдается. Корреляции содержания суммы хлорофиллов, а также каротиноидов с количеством осадков в мае–июне текущего года не установлены при критических значениях *t*-критерия. Из-за постоянного избытка влаги в этот период определяющую роль в синтезе фотосинтетических пигментов играет температура, а не осадки.

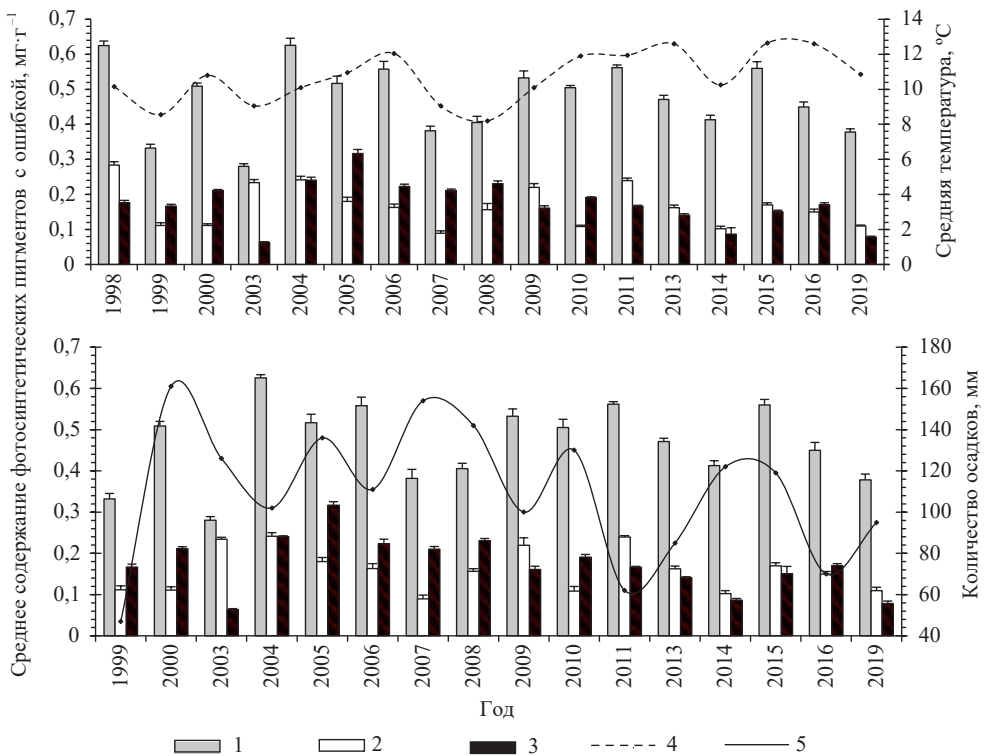


Рис. 3. Динамика метеорологических показателей (май–июнь) и содержания фотосинтетических пигментов в 1-летней хвое сосны: 1 – хлорофилл *a*; 2 – хлорофилл *b*; 3 – каротиноиды; 4 – температура; 5 – осадки

Fig. 3. The dynamics of meteorological indicators (May–June) and the content of photosynthetic pigments in 1-year-old pine needles: 1 – chlorophyll *a*; 2 – chlorophyll *b*; 3 – carotenoids; 4 – temperature; 5 – precipitation

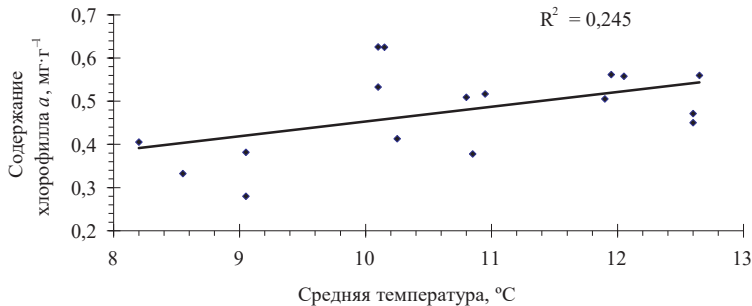


Рис. 4. Тренд линейной регрессии содержания хлорофилла *a* в 1-летней хвое и средней температуры воздуха в мае–июне текущего года (за период с 1998 по 2019 гг.)

Fig. 4. The linear regression trend of chlorophyll *a* content in 1-year-old needles and the average air temperature in May–June of the current year (for the period from 1998 to 2019)

Это соответствует результатам, полученным другими авторами [12], которые указывают на летнее повышение содержания зеленых пигментов в хвое сосны и линейную связь концентрации хлорофилла с температурой воздуха и почвы в течение вегетации в сфагновых типах лесах.

*Заключение*

Мониторинг метаболических реакций у древесных растений необходим для понимания процессов адаптации и прогнозирования функционирования лесных экосистем в изменяющихся условиях внешней среды. Структурно-функциональная перестройка ассимиляционного аппарата в связи с сезонным развитием обеспечивает устойчивость деревьев при воздействии стрессовых факторов.

Изучение сезонной динамики фотосинтетического пигментного комплекса 1-летней хвой сосны показало, что при положительной температуре в осенний период количество зеленых пигментов существенно не снижается. Значительное уменьшение их содержания наблюдается только при наступлении морозов в ноябре–декабре. Повышенная температура (по сравнению со среднемноголетней) осенью стимулирует синтез хлорофиллов в хвое, что может негативно отразиться на закаливании деревьев перед перезимовкой. Вместе с тем с октября при положительной температуре наблюдается значительный рост концентрации каротиноидов, что рассматривается как адаптивная реакция, направленная на предотвращение фотодинамической деструкции и развитие устойчивости фотосинтетического аппарата к неблагоприятным условиям зимы в северных широтах. Роль низкомолекулярных неферментативных антиоксидантов в этот период усиливается.

Для мая–июня 1998–2019 гг. установлено сходство в годичной динамике среднемесячной температуры воздуха и содержания хлорофилла *a* и каротиноидов в 1-летней хвое. В условиях избыточного увлажнения за 20-летний период количество осадков не оказало значительного влияния на содержание фотосинтетических пигментов в хвое сосны. Можно предположить, что вследствие повышенной увлажненности почв северной тайги в начале вегетации и в ее активную фазу температура оказывает значимое влияние на фотосинтетическую активность хвой сосны. Динамика содержания фотосинтетических пигментов хвой сосны может быть одним из критериев оценки устойчивости сосновых насаждений и разработки стратегии ведения лесного хозяйства на избыточно увлажненных почвах северной тайги в условиях изменения климата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Веретенников А.В. Влияние временного избыточного увлажнения на физиологические процессы древесных растений. М.: Наука, 1964. 87 с.  
Veretennikov A.V. *The Effect of Temporary Excess Moisture on the Physiological Processes of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 87 p. (In Russ.).
2. Веретенников А.В. Метаболизм древесных растений в условиях корневой аноксии. Воронеж: Воронежский ун-т, 1985. 152 с.  
Veretennikov A.V. *Metabolism of Woody Plants under Conditions of Root Anoxia*. Voronezh, Voronezh University Publ., 1985. 152 p. (In Russ.).
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 59 с.  
*The Second Assessment Report of the Russian Hydrometeorological Service on Climate Change and its Impacts on the Territory of the Russian Federation*. Moscow, Rosgidromet Publ., 2014. 59 p. (In Russ.).
4. Гисметео. Режим доступа: <http://gismeteo.ru/diary/3915/> (дата обращения: 31.10.22).

- Gismeteo*. Available at: <http://gismeteo.ru/diary/3915/> (accessed 31.10.22). (In Russ.).
5. Грищенко И.В. Климат Архангельской области. Архангельск: Типография А4, 2017. 203 с.
- Grishchenko I.V. *Climate of the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, A4 Print. House, 2017. 203 p. (In Russ.).
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М., 2022. 110 с.
- Report on Climate Characteristics in the Territory of the Russian Federation for 2021. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)*. Moscow, 2022. 110 p. (In Russ.).
7. Есичев А.О. Корреляция признаков пигментного состава хвои представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в дендропарке Сергачского лесничества Нижегородской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 3. С. 43–53.
- Esichev A.O. Correlation of Characteristics of the Needle Pigment Combination of Representatives of the Genus Larch (*Larix* Mill.) in the Arboretum of the Sergachsky Forestry in the Nizhny Novgorod Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 3, pp. 43–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.43>
8. Замолодчиков Д.Г., Краев Г.Н. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4(48). С. 23–31.
- Zamolodchikov D.G., Kraev G.N. The Impact of Climate Change on Russian Forests: Recorded Impacts and Projected Estimates. *Ustojchivoye lesopol'zovanie*, 2016, no. 4(48), pp. 23–31. (In Russ.).
9. Маслова Т.Г., Мамушина Н.С., Шерстнева О.А., Буболо Л.С., Зубкова Е.К. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата у зимневегетирующих хвойных растений в различные сезоны года // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 5. С. 672–681.
- Maslova T.G., Mamushina N.S., Sherstneva O.A., Bubolo L.S., Zubkova E.K. Seasonal Structural and Functional Changes in the Photosynthetic Apparatus of Evergreen Conifers. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, vol. 56, pp. 607–615. <https://doi.org/10.1134/S1021443709050045>
10. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тихонов В.А., Чернокульский А.В., Сигаева Е.В. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Докл. Рос. акад. наук. 2005. Т. 402, № 2. С. 243–247.
- Mokhov I.I., Eliseev A.V., Demchenko P.F., Khon V.Ch., Akperov M.G., Arzhanov M.M., Karpenko A.A., Tikhonov V.A., Chernokul'skij A.V., Sigaeva E.V. Climate Change and its Assessments Using the Global Model of the Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences. *Doklady Rossijskoj akademii nauk*, 2005, vol. 402, no. 2, pp. 243–247. (In Russ.).
11. Практикум по физиологии растений / под ред. Н.Н. Третьякова, Т.В. Карнауковой, Л.А. Паничкина и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
- Tutorial in Plant Physiology*. Ed. by N.N. Tretyakov, T.V. Karnaukhova, L.A. Panichkin et al. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 271 p. (In Russ.).
12. Тужилкина В.В. Пигментный комплекс хвои сосны в лесах Европейского северо-востока // Лесоведение. 2012. № 4. С. 16–23.
- Tuzhilkina V.V. Pigment Complex of Pine in Phytocenoses of the European North-East. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2012, no. 4, pp. 16–23. (In Russ.).
13. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Северо-Евразийский Климатический центр. Режим доступа: <http://seakc.meteoinfo.ru/> (дата обращения: 31.10.22).

*Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. North Eurasia Climate Centre.* (In Russ.).

14. Яцко Я.Н., Дымова О.В., Головки Т.К. Пигментный комплекс зимне- и вечнозеленых растений в подзоне средней тайги европейского Северо-Востока // Ботанич. журн. 2009. Т. 94, № 12. С. 1812–1820.

Yatsko Ya.N., Dymova O.V., Golovko T.K. Pigment Complex of Winter and Evergreen Plants in the Middle Taiga Subzone of the European North-East. *Botanicheskij zhurnal*, 2009, vol. 94, no. 12, pp. 1812–1820. (In Russ.).

15. Beaulieu J., Rainville A. Adaptation to Climate Change: Genetic Variation is Both a Short- and a Long-Term Solution. *The Forestry Chronicle*, 2005, vol. 81, no. 5, pp. 704–709. <https://doi.org/10.5558/tfc81704-5>

16. Björkman O. Responses to Different Quantum Flux Densities. *Physiological Plant Ecology I. Encyclopedia of Plant Physiology*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 1981, vol. 12, pp. 57–107. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68090-8_4)

17. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. by R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Switzerland, Geneva, IPCC, 2014. 151 p.

18. Demmig-Adams B., Adams III W.W. Photoprotection in an Ecological Context: The Remarkable Complexity of Thermal Energy Dissipation. *New Phytologist*, 2006, vol. 172, iss. 1, pp. 11–21. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01835.x>

19. Dyderski M.K., Paž S., Frelich L.E., Jagodziński A.M. How Much Does Climate Change Threaten European Forest Tree Species Distributions? *Global Change Biology*, 2018, vol. 24, iss. 3, pp. 1150–1163. <https://doi.org/10.1111/gcb.13925>

20. Huang J.-G., Bergeron Y., Berninger F., Zhai L., Tardif J.C., Denneler B. Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest. *PLoS One*, 2013, vol. 8, iss. 2, art. no. e56758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056758>

21. Ivanov L.A., Ivanova L.A., Ronzhina D.A., Yudina P.K. Changes in the Chlorophyll and Carotenoid Contents in the Leaves of Steppe Plants along a Latitudinal Gradient in South Ural. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2013, vol. 60, pp. 812–820. <https://doi.org/10.1134/S1021443713050075>

22. Kapeller S., Lexer M.J., Geburek T., Hiebl J., Schueler S. Intraspecific Variation in Climate Response of Norway Spruce in the Eastern Alpine Range: Selecting Appropriate Provenances for Future Climate. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 271, pp. 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.039>

23. Öquist G., Huner N.P.A. Photosynthesis of Overwintering Evergreen Plants. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, vol. 54, pp. 329–355. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.072402.115741>

24. Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Milyutin L.I., Parfenova E.I., Wykoff W.R., Kouzmina N.A. Assessing Population Responses to Climate in *Pinus sylvestris* and *Larix* spp. of Eurasia with Climate-Transfer Models. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 6, iss. 2, pp. 83–98.

25. Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Ye.I., Wykoff W.R., Kouzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, iss. 9, pp. 912–929. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x>

26. Savolainen O., Bokma F., García-Gil R., Komulainen P., Repo T. Genetic Variation in Cessation of Growth and Frost Hardiness and Consequences for Adaptation of *Pinus sylvestris* to Climatic Changes. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 197, iss. 1–3, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.006>

27. Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Y.E. Adaptive Responses of Morphological Forms of the Pine (*Pinus sylvestris* L.) under Stressful Conditions of the Northern Taiga (in the Northern Dvina Basin). *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, pp. 377–387. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040091>

28. Vejputsková M., Cihák T. Climate Response of Douglas Fir Reveals Recently Increased Sensitivity to Drought Stress in Central Europe. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 2, art. no. 97. <https://doi.org/10.3390/f10020097>

29. Villeneuve I., Lamhamedi M.S., Benomar L., Rainville A., DeBlois J., Beaulieu J., Bousquet J., Lambert M-C., Margolis H. Morpho-Physiological Variation of White Spruce Seedlings from Various Seed Sources and Implications for Deployment under Climate Change. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, art. no. 1450. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01450>

30. Yudina P.K., Ivanova L.A., Ronzhina D.A., Zolotareva N.V., Ivanov L.A. Variation of Leaf Traits and Pigment Content in Three Species of Steppe Plants Depending on the Climate Aridity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, vol. 64, pp. 410–422. <https://doi.org/10.1134/S1021443717020145>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

Научная статья

УДК 630\*2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-78-89

## Лесоводственная оценка мероприятий по сохранению ключевых биотопов на сплошных вырубках в Вологодской области

*О.А. Конюшатов, канд. с.-х. наук, доц.*; ResearcherID: [JEZ-9194-2023](https://orcid.org/0009-0007-9819-4219),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9819-4219>

*С.А. Корчагов<sup>✉</sup>, д-р с.-х. наук, проф.*; ResearcherID: [HLQ-4954-2023](https://orcid.org/0000-0001-5492-9550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

*Д.В. Беляков, канд. с.-х. наук*; ResearcherID: [AAX-2399-2021](https://orcid.org/0000-0003-2588-1492),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2588-1492>

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства – Вологодская региональная лаборатория, ул. Горького, д. 83а, г. Вологда, Россия, 160016;

[konyushatov\\_oa@sevniilh-arh.ru](mailto:konyushatov_oa@sevniilh-arh.ru), [korchagov@sevniilh-arh.ru](mailto:korchagov@sevniilh-arh.ru)<sup>✉</sup>,

[belyakovdima09111995@yandex.ru](mailto:belyakovdima09111995@yandex.ru)

---

Поступила в редакцию 31.09.24 / Одобрена после рецензирования 18.12.24 / Принята к печати 19.12.24


---

**Аннотация.** Сплошные рубки приводят к изменению структуры биогеоценозов, возрастного и видового состава древостоев, разнообразия и обилия растительности. В статье дана лесоводственно-экономическая оценка мероприятий по сохранению ключевых биотопов с избыточным увлажнением почв при сплошных рубках, проведенных по сортиментной и хлыстовой технологиям заготовки древесины в Вологодской области. Проанализированы устойчивость насаждений и флористическое разнообразие в ключевых биотопах, обоснована необходимость и параметры выделения защитных зон. Мониторинговые наблюдения показывают, что выделенные при рубке ключевые биотопы сохранились в своих границах. В ключевых биотопах не утратили жизнеспособность редкие и экстраординарные виды растений. Оценивая разнообразие флоры, следует отметить, что число видов в биотопах с временным избыточным увлажнением в среднем в 1,5 раза превышает число видов в граничащих древостоях до рубки и в 1,8 раза – древостоев на примыкающих вырубках (спустя 1–7 лет после рубки). В биотопах с постоянным избыточным увлажнением этот показатель выше в 1,7 и в 1,8 раза соответственно. При проведении сплошных рубок по сортиментной и хлыстовой технологиям с сохранением ключевых биотопов и без рентабельность лесозаготовительных работ достоверно не различается. Целесообразность хлыстовой лесозаготовки на 19,9 % превышает аналогичный показатель сортиментной технологии, что связано с более низкой себестоимостью работ. С лесоводственно-экологической позиции оставление ключевых биотопов при разработке лесосек является эффективным мероприятием, направленным на поддержание биологического разнообразия на локальном уровне. С экономической точки зрения сохранение ключевых биотопов при сплошных рубках желательно и позволяет сократить производственные расходы на лесосечные работы путем оставления неэксплуатационных участков с низкокачественной древесиной.

**Ключевые слова:** биологическое разнообразие, сплошная вырубка, ключевой биотоп, ядро биотопа, защитная зона биотопа, устойчивость насаждений, лесоводственно-экономическая эффективность

---

© Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Беляков Д.В., 2026

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

**Благодарности:** Публикация подготовлена в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований по теме «Разработка технологии заготовки древесины с сохранением биологического разнообразия в таежной зоне Европейской части России» (рег. номер 125021202004-5). В сборе и обработке полевого материала принимали участие кандидаты с.-х. наук И.В. Евдокимов, С.Е. Грибов.

**Для цитирования:** Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Беляков Д.В. Лесоводственная оценка мероприятий по сохранению ключевых биотопов на сплошных вырубках в Вологодской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 78–89.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-78-89>

Original article

## Silvicultural Assessment of Measures to Preserve Key Biotopes in Clear-Cut Areas in the Vologda Region

**Oleg A. Konyushatov**, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [JEZ-9194-2023](https://orcid.org/0009-0007-9819-4219), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9819-4219>

**Sergey A. Korchagov**<sup>✉</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HLQ-4954-2023](https://orcid.org/0000-0001-5492-9550), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

**Dmitry V. Belyakov**, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAX-2399-2021](https://orcid.org/0000-0003-2588-1492), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2588-1492>

Northern Research Institute of Forestry – Vologda Regional Laboratory, ul. Gor'kogo, 83 a, Vologda, 160016, Russian Federation; [konyushatov\\_oa@sevniilh-arh.ru](mailto:konyushatov_oa@sevniilh-arh.ru), [korchagov@sevniilh-arh.ru](mailto:korchagov@sevniilh-arh.ru)<sup>✉</sup>, [belyakovdima09111995@yandex.ru](mailto:belyakovdima09111995@yandex.ru)

---

Received on September 31, 2024 / Approved after reviewing on December 18, 2024 / Accepted on December 19, 2024

---

**Abstract.** Clear-cutting leads to changes in the structure of biogeocenoses, the age and species composition of stands, and the diversity and abundance of vegetation. The article examines the results of a silvicultural and economic assessment of measures to preserve key biotopes with excessive soil moisture during clear-cutting carried out using cut-to-length and tree-length timber harvesting technologies in the Vologda Region. The results of the assessment of stand stability and floristic diversity in key biotopes have been analyzed, and the necessity and parameters for establishing protective zones have been substantiated. Monitoring observations show that the key biotopes identified during logging have been preserved within the boundaries. In key biotopes, rare and extrazonal plant species have not lost their viability. When assessing the diversity of flora, it should be noted that the number of species in biotopes with temporary excess moisture is, on average, 1.5 times higher than the number of species in adjacent stands before logging and 1.8 times higher than the number of species in stands in adjacent cuttings (1–7 years after cutting). In biotopes with constant excessive moisture, this indicator is 1.7 and 1.8 times higher, respectively. When clear-cutting is carried out using cut-to-length and tree-length timber harvesting technologies with and without preservation of key biotopes, the profitability of logging operations does not differ significantly. The feasibility of tree-length timber harvesting is 19.9 % higher than that of the cut-to-length technology, which is due to the lower cost of work. From a silvicultural and environmental perspective, the abandonment of key biotopes in the development of logging areas is an effective measure aimed at maintaining biological diversity at the local level. From an economic point of view, the preservation of key bi-

topes during clear-cutting is desirable and makes it possible to reduce production costs for logging operations by leaving non-operational areas with low-quality timber.

**Keywords:** biological diversity, clear-cutting, key biotope, biotope core, biotope buffer zone, sustainability of the stands, silvicultural and economic efficiency

**Acknowledgements:** The publication was prepared as part of the state assignment to the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for applied research on the topic “Development of Wood Harvesting Technology with Conservation of Biological Diversity in the Taiga Zone of the European Part of Russia” (topic ID no. 125021202004-5). I.V. Evdokimov and S.E. Gribov, candidates of agricultural sciences, took part in the collection and processing of field material.

**For citation:** Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Belyakov D.V. Silvicultural Assessment of Measures to Preserve Key Biotopes in Clear-Cut Areas in the Vologda Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 78–89. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-78-89>

### *Введение*

Экологический баланс на Земле связан с биологическим разнообразием. Антропогенное воздействие на окружающую среду приводит к сокращению и потере биоразнообразия. Если на рубеже XIX–XX вв. природные территории с полностью уничтоженными в результате хозяйственной и иной деятельности человека экосистемами занимали 20 % суши, то к концу XX столетия – 63,8 % [1]. С начала XX в. исчезновение сортов, видов и даже родов происходит экспоненциально [9]. Уменьшение биоразнообразия нарушает устойчивость лесных экосистем, что негативно влияет на состояние окружающей среды.

В число видов существенного отрицательного воздействия на лесные экосистемы входят лесозаготовки, вызывающие почвенную эрозию, загрязнение почв и вод горюче-смазочными материалами, нарушение гидрологических условий, изменение в дренажном режиме водотоков, фрагментацию мест обитания животных и растений [13, 21, 23]. Возможные экологические последствия антропогенной динамики лесного покрова очень разноплановы – от изменения микроклиматических условий до трансформации флористических и фаунистических комплексов [6]. Ежегодная площадь вырубок в Вологодской области превышает 70 тыс. га, в связи с чем вопрос сохранения локальных объектов биологического разнообразия при лесозаготовках является актуальным. Одним из вариантов сбережения биоразнообразия при рубках является выделение ключевых биотопов в виде неэксплуатационных площадей, где не проводятся хозяйственные мероприятия [4, 11, 22, 27].

Цель работы – дать лесоводственно-экономическую оценку мероприятий по сохранению ключевых биотопов на сплошных вырубках в Вологодской области.

### *Объекты и методы исследования*

Стационарные полевые объекты расположены на территории Вологодской области (Балтийско-Белозерский и Южно-таежный лесные районы Европейской части РФ).

На объектах исследования проведены сплошные рубки с использованием сортиментной и хлыстовой технологии заготовки древесины (табл. 1):

1) валка деревьев и обрезка сучьев выполнены в пасаках с использованием бензопил, трелевка хлыстов на погрузочную площадку осуществлялась с применением трелевочного трактора с чокерной оснасткой, раскряжевка стволов на сортименты проходила на погрузочной площадке с применением бензопил (объект 8);

2) валка деревьев, обрезка сучьев, раскряжевка стволов на сортименты осуществлены на пасаках с применением бензопил, трелевка сортиментов на погрузочную площадку – форвардера (объект 7);

3) валка деревьев, обрезка сучьев, раскряжевка стволов на сортименты произведены на пасаках с использованием харвестера, трелевка сортиментов на погрузочную площадку – форвардера (объекты 1–5, 9, 10).

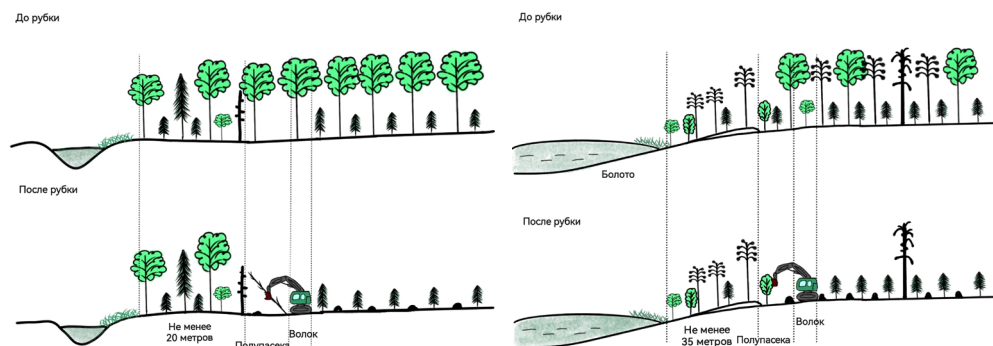
Таблица 1

**Характеристика объектов исследования**  
**The characteristics of the research objects**

Номер объекта	Площадь лесосеки, га	Год проведения рубки	Технология заготовки древесины
<i>Лесосеки, граничащие с участками леса вдоль временных водных объектов (временное избыточное увлажнение)</i>			
1	21,5	2018	Сортиментная
2	11,0	2019	
3	18,4	2023	
<i>Лесосеки, граничащие с заболоченными участками леса в бессточных понижениях (постоянное избыточное увлажнение)</i>			
4	24,9	2019	Сортиментная
5	18,5	2023	
6	8,0	–	Заготовка не проводилась
<i>Лесосеки, граничащие с участками леса на окраинах болот (постоянное избыточное увлажнение)</i>			
7	12,2	2023	Сортиментная
8	6,0	2020	Хлыстовая

Для заготовки древесины использовались следующие машины и механизмы: харвестер (гусеничный экскаватор) Komatsu PS210LC-10MO с харвестерной головкой Ponsse H7 HD, форвардер «Амкодор 2662-01», трелевочный трактор ТДТ-55, бензопила Stihl MS 361.

В ходе рубок на лесосеках сохранены ключевые биотопы с временным (участки леса вдоль временных водных объектов) и постоянным (заболоченные участки леса в бессточных понижениях, участки леса на окраинах болот) избыточным увлажнением в центральной части (ядре). Также предусмотрены защитные зоны вокруг центральной части биотопа (ядра): на участках с временным избыточным увлажнением – шириной 20 м, с постоянным избыточным увлажнением – 35 м (см. рисунок).



Технологическая схема заготовки древесины с сохранением ключевого биотопа с временным (слева) и постоянным (справа) избыточным увлажнением почвы  
The technological scheme of timber harvesting with preservation of the key biotope with temporary (left) and permanent (right) excess soil moistening

Границу между ядром, защитной зоной и лесосекой устанавливали по изменению рельефа, почвенно-гидрологических условий и видовому составу растений.

Методика исследования включала общепринятые лесоводственно-биологические методы [3, 5, 7, 12, 14–19] и экономические подходы [8, 20]. В ходе закладки полевых объектов и последующих мониторинговых наблюдений, выполненных на лесосеках и в сохраненных ключевых биотопах в год рубки, а также на прилегающих к биотопам вырубках различной давности, проведен детальный учет древостоя, подроста, подлеска и живого напочвенного покрова.

### Результаты исследования и их обсуждение

В ряде биотопов, в отличие от граничащих лесосек, произрастают сложные по строению древостои с более широким видовым разнообразием растений в древесном ярусе. Некоторые ключевые биотопы (объекты 5 и 7) имеют сложную структуру древостоя, представленную 2 ярусами (табл. 2).

Таблица 2

**Краткая таксационная характеристика ключевых биотопов**  
**The brief inventory characteristics of the key biotopes**

Номер объекта	Площадь биотопа, га	Состав древостоя	Класс бонитета	Полнота	Запас древесины, м <sup>3</sup> /га
<i>Участки леса вдоль временных водных объектов</i>					
1	1,30	6Б2Е2Ос ед.Ол <sub>с</sub> ед.ЛП	I	0,43	145
2	1,70	5ЕЗС2Б+Ол <sub>с</sub>	IV	0,98	318
3	5,50	6ЕЗС1Б ед.Ив	III	1,17	441
<i>Заболоченные участки леса в бессточных понижениях</i>					
4	1,80	6Б3Ос1Е ед.Ол <sub>с</sub>	II	0,81	231
5	1,50	1-й ярус: 7Б3Ос+С	III	0,52	131
		2-й ярус: 9Е1Ол <sub>с</sub>		0,46	58
6	2,20	6Е3Ос1Б+Ол <sub>с</sub> ед.С		0,95	386
<i>Участки леса на окраинах болот</i>					
7	0,28	1-й ярус: 6Б3Ос1С	III	1,32	352
		2-й ярус: 10Е+Ол <sub>с</sub>		0,40	49
8	1,30	8С2Е+Б		0,65	179

Результаты мониторинговых наблюдений 2025 г. показывают, что выделенные при рубке 1–7-летней давности ключевые биотопы сохранились в своих границах. В биотопах отсутствуют следы пожаров, нелегальной заготовки древесины и других негативных воздействий.

Как в момент закладки опыта, так и в настоящее время древостои в биотопах характеризуются ослабленным состоянием. Класс санитарного состояния насаждений изменяется от 1,9 до 3,3. Наблюдаются локальные ветровальные явления – преимущественно по границе биотопа и вырубки. Объем сухостойных и валежных деревьев различается на отдельных участках и составляет 1–22 % от общего количества сохраненной в биотопах древесины.

Результаты мониторинга свидетельствуют о более высоком классе устойчивости лиственно-хвойных насаждений в ключевых биотопах, в сравнении с хвойно-лиственными насаждениями. Наиболее устойчивыми к изменению условий после рубки являются деревья лиственных пород, а также хвойные деревья, сформировавшиеся в пределах относительно разреженных участков исходного древостоя – со сбежистым стволом и низко опущенной кроной. Этот факт позволяет рекомендовать в приоритетном порядке их оставление в качестве локальных объектов биоразнообразия (табл. 3).

Таблица 3

**Показатели санитарного состояния и устойчивости насаждений  
в ключевых биотопах**  
**The indicators of sanitary condition and sustainability  
of the stands in the key biotopes**

Номер объекта	Категория насаждений	Объем сухостойной и валежной древесины, %	Класс	
			санитарного состояния	устойчивости
<i>Участки леса вдоль временных водных объектов</i>				
1	Лиственно-хвойные	22	II,8	1
2	Хвойно-лиственные	14	II,7	2
3		1	II,1	1
<i>Заболоченные участки леса в бессточных понижениях</i>				
4	Лиственно-хвойные	19	II,4	1
5		1	II,0	1
6	Хвойно-лиственные	1	III,0	1
<i>Участки леса на окраинах болот</i>				
7	Лиственно-хвойные	1	I,9	1
8	Хвойно-лиственные	14	III,3	2

Мониторинг показал, что в защитных зонах биотопов в настоящее время сохранили жизнеспособность виды, характерные для широколиственных лесов: липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), а также редкие виды растений: камыш укореняющийся (*Scirpus radicans* Schkuhr), лобария легочная (*Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm), некера перистая (*Neckera pennata* Hedw.). В 7 из 8 обследованных ключевых биотопов обнаружены виды в единичном экземпляре, что указывает на их определенную уникальность.

В живом напочвенном покрове ядра ключевых биотопов отмечена гидрофильная растительность. В пониженных элементах рельефа продолжают доминировать осоки (*Carex*), сфагновые мхи (*Sphagnum*) и другие влаголюбивые виды.

Оценивая разнообразие флоры, можно сказать, что число видов, включая древесно-кустарниковые и травянистые растения, лишайники и мхи, в биотопах с временным избыточным увлажнением в среднем в 1,5 раза превышает количество видов в граничащих древостоях до рубки и в 1,8 раза – на примыкающих вырубках (спустя 1–7 лет после рубки). В биотопах с постоянным избыточным увлажнением этот показатель выше в 1,7 и в 1,8 раза соответственно. Достоверность различий между числом видов растений в ключевых биотопах и на граничащих территориях доказана на всех уровнях значимости ( $t_{\text{факт.}} \geq 5,2$  при  $t_{\text{ст}} = 3,5$ ) (табл. 4).

Таблица 4

**Число видов флоры в различных элементах объектов исследования**  
**The number of flora species in various elements of the research objects**

Элемент леса	Численность видов, шт.		
	ключевой биотоп	примыкающие	
		древостой	вырубка
<i>Объекты с наличием биотопов с временным избыточным увлажнением</i>			
Древесно-кустарниковые растения	9	7	7
Травянистые растения, лишайники, мхи	31	19	15
<i>Итого</i>	40	26	22
<i>Объекты с наличием биотопов с постоянным избыточным увлажнением</i>			
Древесно-кустарниковые растения	9	7	7
Травянистые растения, лишайники, мхи	23	12	11
<i>Итого</i>	32	19	18

Индексы сходства Жаккара и Сьеренсена–Чекановского, составляющие менее 0,40 для пары «биотоп–древостой» и менее 0,32 для пары «биотоп–вырубка», свидетельствуют о незначительном сходстве видов растений в различных элементах объектов исследования (табл. 5).

Таблица 5

**Численность видов и индексы сходства флористического разнообразия**  
**для пар «биотоп–древостой» и «биотоп–вырубка»**  
**The number of species and the indices of similarity of floristic diversity**  
**for the “biotope–stand” and “biotope–cutting area” pairs**

Пара	Номер объекта	Численность видов растений, шт.		Индекс сходства	
		ключевой биотоп	примыкающий древостой	Жаккара	Сьеренсена – Чекановского
<i>Объекты с наличием биотопов с временным избыточным увлажнением</i>					
Биотоп–древостой	2	41 (7/34)*	24 (7/17)	0,25	0,40
	3	51 (13/38)	38 (9/27)	0,24	0,38
Биотоп–вырубка	1	33 (11/22)	24 (7/17)	0,19	0,32
	2	41 (7/34)	19 (6/13)	0,16	0,23

Окончание табл. 5

Пара	Номер объекта	Численность видов растений, шт.		Индекс сходства	
		ключевой биотоп	примыкающий древостой	Жаккара	Сьеренсена – Чекановского
<i>Объекты с наличием биотопов с постоянным избыточным увлажнением</i>					
Биотоп–древостой	5	34 (6/28)	12 (3/9)	0,21	0,28
	6	38 (8/30)	32 (12/20)	0,23	0,37
	7	15 (7/8)	8 (3/5)	0,21	0,35
	8	37 (8/29)	29 (10/19)	0,22	0,36
Биотоп–вырубка	4	32 (10/22)	18 (7/11)	0,11	0,20

\*В числителе приведено количество древесно-кустарниковых растений, в знаменателе – травянистых растений, лишайников и мхов.

Результаты исследования подтверждают более высокий уровень флористического разнообразия в биотопах в сравнении с граничащими территориями, что соответствует и данным других исследователей [2, 10, 24–26].

В ключевых биотопах и в граничащих лесосеках (до рубки) возможно получение хвойных пиловочных бревен, березового фанерного кряжа, хвойных и лиственных балансов (табл. 6).

Таблица 6

**Товарно-сортиментная структура древостоев (%) на лесосеках (числитель)  
и в ключевых биотопах (знаменатель)  
The commodity and assortment structure of stands (%) in logging areas (numerator)  
and in key biotopes (denominator)**

Номер объекта	Деловая древесина				Дровяная древесина	Ликвидная древесина	Отходы	Класс товарности
	пиловочник	фанерный кряж	баланси	итого				
<i>Лесосеки с наличием биотопов с временным избыточным увлажнением</i>								
1	<u>12,1</u>	<u>21,9</u>	<u>32,4</u>	<u>66,4</u>	<u>26,6</u>	<u>93,0</u>	<u>7,0</u>	<u>II</u>
	11,7	18,1	12,2	42,0	45,8	87,8	12,2	III
2	<u>48,4</u>	<u>3,8</u>	<u>10,0</u>	<u>62,2</u>	<u>28,5</u>	<u>90,7</u>	<u>9,3</u>	<u>II</u>
	29,2	6,8	8,3	44,3	45,3	89,6	10,4	III
3	<u>39,8</u>	–	<u>34,5</u>	<u>73,1</u>	<u>16,4</u>	<u>89,5</u>	<u>9,3</u>	<u>II</u>
	52,8		25,4	78,2	13,3	91,5	8,5	II
<i>Лесосеки с наличием биотопов с постоянным избыточным увлажнением</i>								
4	<u>1,7</u>	<u>25,8</u>	<u>37,6</u>	<u>65,1</u>	<u>25,3</u>	<u>90,4</u>	<u>9,6</u>	<u>II</u>
	1,7	17,8	19,7	39,2	49,0	88,2	11,8	III
5	<u>17,2</u>	<u>7,6</u>	<u>13,7</u>	<u>38,5</u>	<u>51,2</u>	<u>89,7</u>	<u>10,3</u>	<u>III</u>
	7,1	11,4	15,0	33,5	54,2	87,7	12,3	III
7	<u>29,8</u>	<u>5,6</u>	<u>16,7</u>	<u>52,1</u>	<u>38,1</u>	<u>90,2</u>	<u>9,8</u>	<u>II</u>
	7,1	14,7	15,5	37,3	51,1	88,4	11,6	III
8	<u>49,9</u>	–	<u>18,5</u>	<u>68,4</u>	<u>22,2</u>	<u>90,6</u>	<u>9,3</u>	<u>II</u>
	37,7		38,9	76,6	14,5	91,1	8,4	II

Выход деловой древесины в ключевых биотопах с временным переувлажнением составляет в среднем 54,8 %, с постоянным переувлажнением – 46,7 %. Различия в выходе деловых сортиментов достигают 8,1 % в пользу менее сырых участков с временным переувлажнением почвы.

Древостои в ключевых биотопах характеризуются III классом товарности, в граничащих древостоях до рубки – II классом. В биотопах с временным избыточным увлажнением выход деловой древесины на 12,4 % меньше, чем на примыкающих лесосеках (до рубки), в биотопах с постоянным избыточным увлажнением показатель ниже на 9,3 %.

Заготовка древесины с сохранением биотопов, независимо от технологии проведения работ, является рентабельной (32,3–66,1 %) (табл. 7).

Таблица 7

**Результаты экономической оценки сплошных рубок без сохранения (числитель) и с сохранением (знаменатель) биотопов при заготовке древесины по хлыстовой и сортиментной технологиям**

**The results of the economic assessment of clear-cuttings without (numerator) and with (denominator) preservation of biotopes during timber harvesting using tree-length and cut-to-length technologies**

Номер объекта	Стоимость, тыс. р		Прибыль, тыс. р	Рентабельность	
	реализация древесины	затраты		%	Δ*
<i>Ключевые биотопы</i>					
<i>Сортиментная технология заготовки древесины (харвестер и форвардер)</i>					
1	10 368,0	6292,2	4075,8	39,3	+0,1
	10 028,5	6080,4	3948,1	39,4	
2	10 367,0	4224,2	6142,8	59,3	+1,3
	9167,5	3586,5	5581,0	60,9	
3	11 174,9	5169,9	6005,0	53,7	–11,8
	3945,1	2292,8	1652,3	41,9	
4	10 046,5	6868,8	3177,7	31,2	+1,1
	9443,7	6395,8	3047,9	32,3	
5	9290,9	6324,8	2966,1	31,9	+0,5
	8882,5	6004,2	2878,3	32,4	
<i>Сортиментная технология заготовки древесины (бензопилы и форвардер)</i>					
7	6681,3	3039,0	3642,3	54,5	+0,5
	6504,3	2929,3	3575,0	55,0	
<i>Хлыстовая технология заготовки древесины (бензопилы и трелевочный трактор с чокерной оснасткой)</i>					
8	3337,8	1116,5	2221,3	66,5	–0,4
	2756,3	934,8	1821,5	66,1	

\*Различия между значениями рентабельности проведения сплошных рубок без сохранения и с сохранением ключевых биотопов.

При проведении сплошных рубок по сортиментной технологии с выделением и сохранением древостоя в биотопах рентабельность лесозаготовительных работ составила в среднем 46,2 %, при заготовке древесины в ключевых биотопах – 45,3 %. Хлыстовая технология заготовки древесины с оставлением ключевых биотопов позволила добиться рентабельности 66,1 % (при их вырубке 66,5 %). Рентабельность в этом случае на 19,9 % превышает аналогичный показатель для сортиментной технологии, что связано с более низкой себестоимостью работ.

При выполнении сплошных рубок по рассматриваемым технологиям с выделением и сохранением ключевых биотопов площадью до 15 % от общей

территории лесосеки отмечается незначительное увеличение рентабельности производства (до +1,3 %). На объектах 3 и 8 целесообразность заготовки древесины при оставлении ключевого биотопа снизилась соответственно на 11,8 и 0,4 %, что, по-видимому, объясняется наличием значительного запаса деловой древесины в ключевых биотопах большой площади (21,0 и 29,9 % от общего размера лесосеки).

### Заключение

Сохранение при сплошных рубках ключевых биотопов с избыточным увлажнением является эффективным лесоводственным мероприятием для сохранения рентабельности лесозаготовительных работ.

При планировании и проведении сплошных рубок в качестве биотопов рекомендуется выделять и сохранять переувлажненные участки леса и защитные зоны вокруг них, что позволит поддерживать флористическое разнообразие.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агафонов В.Б. Правовые проблемы охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности при пользовании недрами // Правовое регулирование использования природных ресурсов. М.: Инфра-М, 2015. С. 141–144.

Agafonov V.B. Legal Issues of Environmental Protection and Ensuring Environmental Safety in the Use of Subsoil Resources. *Legal Regulation of the Use of Natural Resources*. Moscow, Infra-M Publ., 2015, pp. 141–144. (In Russ.).

2. Андреева С.В., Бубличенко А.Г., Бубличенко Ю.Н., Загидуллина А.Т., Глушкова Н.Б., Книзе А.А., Коткова В.М., Кушневская Е.В., Мосягина Е.В., Носова Е.А., Рождественский С.Ю. Результаты исследований биологического разнообразия на территории Псковского модельного леса. СПб., 2010. 112 с.

Andreeva S.V., Bublichenko A.G., Bublichenko Yu.N., Zagidullina A.T., Glushkovskaya N.B., Knieze A.A., Kotkova V.M., Kushnevskaya E.V., Mosyagina E.V., Nosova E.A., Rozhdestvenskij S.Yu. *The Results on Research of Biological Diversity in the Territory of the Pskov Model Forest*. St. Petersburg, 2010. 112 p. (In Russ.).

3. Астрологова Л.Е., Гортинский Г.Б. Методические указания к проведению полевой практики по ботанике. Архангельск: АЛТИ, 1980. 32 с.

Astrologova L.E., Gortinskij G.B. *Guidelines for Conducting Field Practice in Botany*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forestry Engineering Institute, 1980. 32 p. (In Russ.).

4. Беляков Д.В. Лесоводственная оценка мер по сохранению биологического разнообразия на сплошных вырубках в таежной зоне (на примере Вологодской области): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2024. 20 с.

Belyakov D.V. *Silvicultural Assessment of Measures to Preserve Biological Diversity in Clear-Cut Areas in the Taiga Zone (Using the Vologda Region as an Example)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2024. 20 p. (In Russ.).

5. Боголюбов А.С. Простейшие методы статистической обработки результатов экологических исследований. М.: Экосистема, 1998. 13 с.

Bogolyubov A.S. *The Simplest Methods of Statistical Processing of Environmental Research Results*. Moscow, Ekosistema Publ., 1998. 13 p. (In Russ.).

6. Громцев А.Н. Основы ландшафтной экологии европейских таежных лесов России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 268 с.

Gromtsev A.N. *Fundamentals of Landscape Ecology of European Taiga Forests of Russia*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2008. 268 p. (In Russ.).

7. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: АГТУ, 2002. 112 с.  
Gusev I.I. *Ecosystem Modelling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p. (In Russ.).
8. Данченко М.А. Экономика природных комплексов. Томск: ТомГУ государственный университет, 2009. 120 с.  
Danchenko M.A. *Economics of Natural Complexes*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2009. 120 p. (In Russ.).
9. Ильина О., Карпачевский М., Яницкая Т. Нормативно-правовая основа сохранения биоразнообразия при заготовках древесины и рекомендации по ее применению. М., 2009. 36 с.  
Il'ina O., Karpachevskij M., Yanitskaya T. *The Regulatory Framework for Biodiversity Conservation during Timber Harvesting and Recommendations for its Application*. Moscow, 2009. 36 p. (In Russ.).
10. Карпачевский М.Л., Тепляков В.К., Яницкая Т.О., Ярошенко А.Ю., Брюханов А.В., Букварева Е.Н., Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Кулысова А.А., Петров А.П., Рай Е.А. Основы устойчивого лесопользования. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2014. 266 с.  
Karpachevskij M.L., Teplyakov V.K., Yanitskaya T.O., Yaroshenko A.Yu., Bryukhanov A.V., Bukvareva E.N., Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Kulyasova A.A., Petrov A.P., Raj E.A. *Fundamentals of Sustainable Forest Management: 2nd ed., revised and enlarged*. Moscow, 2014. 266 p. (In Russ.).
11. Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Грибов С.Е., Беляков Д.В. Нормативно-правовая база в области сохранения биологического разнообразия при лесопользовании // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России: материалы науч.-практ. конф. Архангельск: СевНИИЛХ, 2023. С. 337–344.  
Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Gribov S.E., Belyakov D.V. Regulatory Framework in the Field of Conservation of Biological Diversity in Forest Management. *Aktual'nye voprosy taezhnogo i pritundrovogo lesovodstva na Evropejskom Severe Rossii: Proceedings of the Scientific and Practical Conference*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry, 2023, pp. 337–344. (In Russ.).
12. Корляков К.А. Основные положения теории экотонных экосистем // Вестн. совета молодых ученых и специалистов Челяб. обл. 2019. Т. 1, № 4(27). С. 3–10.  
Korlyakov K.A. The Main Provisions of the Theory of Ecotonic Ecosystems. *Vestnik soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti*, 2019, vol. 1, no. 4(27), pp. 3–10. (In Russ.).
13. Корчагов С.А., Бабич Н.А., Лупанова И.Н. Повышение эффективности лесопользования в таежной зоне Европейской части России: моногр. Вологда: с. Молочное, Вологодская обл.: Вологодск. ГМХА им. Н.В. Верещагина, 2018. 129 с.  
Korchagov S.A., Babich N.A., Lupanova I.N. *Improving the Efficiency of Forest Management in the Taiga Zone of European Russia: Monograph*. Vologda, Molochnoe Village, Vologda Region: Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, 2018. 129 p. (In Russ.).
14. Красная книга Вологодской области. Т. 2. Растения и грибы / отв. ред. Г.Ю. Конечная, Т.А. Сулова. Вологда: ВГПУ, Русь, 2004. 360 с.  
*The Red Book of the Vologda Region. Vol. 2: Plants and Mushrooms*. Eds.-in-chief G.Yu. Konechnaya, T.A. Suslova. Vologda, Vologda State Pedagogical University Publ., Rus' Publ., 2004. 360 p. (In Russ.).
15. Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: Нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми. Архангельск: Правда Севера, 2012. 672 с.  
*Forest Inventory Handbook for the North-East of the European Part of the Russian Federation: Regulatory Materials for the Nenets Autonomous Okrug, Arkhangelsk, Vologda Regions and the Komi Republic*. Arkhangelsk, Pravda Severa Publ., 2012. 672 p. (In Russ.).

16. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 126 с.  
Nakvasina E.N., Seryj V.S., Semenov B.A. *Field Practicum on Soil Science*. Arkhangelsk, Arkhangelsk State University Publ., 2007. 126 p. (In Russ.).
17. Орлова Н.И. Определитель высших растений Вологодской области. Вологда: ВГПУ, Русь, 1997. 264 с.  
Orlova N.I. *The Identificator of Higher Plants of the Vologda Region*. Vologda, Vologda State Pedagogical University Publ., Rus' Publ., 1997. 264 p. (In Russ.).
18. Тиходеева М.Ю., Лебедева В.Х. Практическая геоботаника (анализ состава растительных сообществ). СПб.: С.-Петербург. ун-т, 2015. 166 с.  
Tikhodeeva M.Yu., Lebedeva V.Kh. *Practical Geobotany (Analysis of the Composition of Plant Communities)*: Textbook. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2015. 166 p. (In Russ.).
19. Шайхутдинова А.А. Методы оценки биоразнообразия: метод. указ. Оренбург: ОГУ, 2019. 37 с.  
Shaikhutdinova A.A. *Methods of Biodiversity Assessment: Methodological Guidelines*. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2019. 37 p. (In Russ.).
20. Шимова О.С., Лопачук О.Н., Байчоров В.М. Экономическая эффективность мероприятий по сохранению биологического разнообразия. Минск: Беларус. Навука, 2010. 123 с.  
Shimova O.S., Lopachuk O.N., Bajchorov V.M. *Economic Efficiency of Measures for the Conservation of Biological Diversity*. Belarus, Minsk, Navuka Publ., 2010. 123 p. (In Russ.).
21. Hämäläinen K., Tahvanainen T., Junninen K. Characteristics of Boreal and Hemiboreal Herb-Rich Forests as Habitats for Polypore Fungi. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 5, art. no. 10001. <https://doi.org/10.14214/sf.10001>
22. Hansson L. Key Habitats in Swedish Managed Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 16, supp. no. 003, pp. 52–61. <https://doi.org/10.1080/028275801300090609>
23. Nirhamo A., Pykälä J., Jääskeläinen K., Kouki J. Habitat Associations of Red-Listed Epiphytic Lichens in Finland. *Silva Fennica*, 2023, vol. 57, no. 1, art. no. 22019. <https://doi.org/10.14214/sf.22019>
24. Oldén A., Selonen V.A.O., Lehtonen E., Kotiaho J.S. The Effect of Buffer Strip Width and Selective Logging on Streamside Plant Communities. *BMC Ecology*, 2019, vol. 19, art. no. 9. <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0225-0>
25. Ring E., Johansson F., Brömssen von C., Bergkvist I. A Snapshot of Forest Buffers near Streams, Ditches, and Lakes on Forest Land in Sweden – Lessons Learned. *Silva Fennica*, 2022, vol. 56, no. 4, art. no. 10676. <https://doi.org/10.14214/sf.10676>
26. Rydgren B., Kyläkorpi L., Bodlund B., Ellegård A., Grusell E., Miliander S. Experiences from Five Years of Using the Biotope Method, a Tool for Quantitative Biodiversity Impact Assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2005, vol. 23, iss. 1, pp. 47–54. <https://doi.org/10.3152/147154605781765760>
27. Sverdrup-Thygeson A. Key Habitats in the Norwegian Production Forest: A Case Study. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 166–178. <https://doi.org/10.1080/028275802753626818>

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

Научная статья

УДК 630\*9:528:502

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-90-102

## Ветровалы в лесах юго-западной части Сахалина под воздействием циклонов

*Р.Н. Сабиров, ст. науч. сотр.*; ResearcherID: [AAG-6821-2021](https://orcid.org/0000-0003-3427-8572),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3427-8572>

*В.А. Мелкий, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.*; ResearcherID: [AAG-6771-2021](https://orcid.org/0000-0001-8919-8508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-8508>

*А.А. Верхотуров<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.*; ResearcherID: [JCO-4468-2023](https://orcid.org/0000-0002-3826-7339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки, д. 1Б, г. Южно-Сахалинск, Россия, 693022; r.sabirov@imgg.ru, vamelkiy@mail.ru, ussr-91@mail.ru<sup>✉</sup>

---

*Поступила в редакцию 24.09.24 / Одобрена после рецензирования 13.12.24 / Принята к печати 15.12.24*

---

**Аннотация.** Тропические циклоны, действующие в западной части Тихого океана в летне-осеннее время, периодически заходят далеко на север, трансформируясь во внетропические. В 2014–2015 гг. при прохождении циклонов в юго-западной части Сахалина были нарушены значительные площади лесов. Цель работы – исследовать масштабы и характер повреждений в лесных насаждениях, подвергнувшихся катастрофическим ветровалам при прохождении внетропических циклонов над юго-западными районами о-ва Сахалина. Оценка повреждений лесов проводилась как наземными, так и дистанционными методами. На пробных площадях, заложенных в различных типах леса, проводился пересчет деревьев, установление необходимых лесотаксационных характеристик, а затем определение запасов сохранившегося древостоя и его погибшей части. Лесные насаждения по степени нарушенности ветровалами были подразделены на 3 категории: полная гибель древостоя или с большой долей погибших деревьев (выше 60 %), средней долей (30–60 %) и незначительной долей (менее 30 %) от их исходных объемов. Для пространственного анализа ветровальных прогалин использовались доступные снимки с космического аппарата Sentinel-2, полученные с 2016 по 2017 гг. Космические снимки исследуемой территории в комбинации каналов 11-8-4 подвергались классификации «с обучением». Обучающая выборка включала набор пикселей, представляющих изображение эталонных участков, на которых выполнялись полевые геоботанические и лесотаксационные исследования. В результате дешифрирования снимков выявлено, что суммарная площадь ветровалов в Холмском и Невельском районах юго-западной части о-ва Сахалина составила 22 735 га. Для исследуемой территории был рассчитан нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) и проанализированы его значения с целью обособления участков с различной степенью повреждений. При этом установлено, что в юго-западной части Сахалина полностью или большей долей погибшие лесонасаждения занимают 19,85 % площади, в средней степени поврежденные – 41,86 %, незначительно поврежденные – 38,29 %.

**Ключевые слова:** ветровал, внетропические циклоны, космические снимки, геоинформационный анализ, лесные земли, древостой, нарушенность



*Для цитирования:* Сабиров Р.Н., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Ветровалы в лесах юго-западной части Сахалина под воздействием циклонов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 90–102. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-90-102>

Original article

## Windfalls in the Forests of the Southwestern Sakhalin under the Influence of Cyclones

*Rinat N. Sabirov*, Senior Research Scientist; ResearcherID: [AAG-6821-2021](https://orcid.org/0000-0003-3427-8572),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3427-8572>

*Vyacheslav A. Melkiy*, Doctor of Engineering, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAG-6771-2021](https://orcid.org/0000-0001-8919-8508), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-8508>

*Aleksey A. Verkhoturov*<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [JCO-4468-2023](https://orcid.org/0000-0002-3826-7339), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>

Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Nauki, 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation; [r.sabirov@imgg.ru](mailto:r.sabirov@imgg.ru), [vamelkiy@mail.ru](mailto:vamelkiy@mail.ru), [ussr-91@mail.ru](mailto:ussr-91@mail.ru)<sup>✉</sup>

---

Received on September 24, 2024 / Approved after reviewing on December 13, 2024 / Accepted on December 15, 2024

---

**Abstract.** Tropical cyclones operating in the western Pacific Ocean in the summer and autumn periodically go far north, transforming into extratropical ones. In 2014–2015, significant areas of forests were disrupted during the passage of cyclones in the southwestern part of Sakhalin. The aim of the research has been to investigate the scale and nature of damage in forest stands subjected to catastrophic windfalls during the passage of extratropical cyclones over the southwestern regions of Sakhalin Island. Forest damage assessment has been carried out using both ground-based and remote sensing methods. In the sample plots established in various types of forest, the trees have been tallied, the necessary forest inventory characteristics have been established, and then the stocks of the remaining stand and its dead part have been determined. Forest stands have been divided into 3 categories according to the degree of damage caused by windfalls: complete loss of a stand or with a large (above 60 %), average (30–60 %) or insignificant (less than 30 %) proportion of dead trees from their original volumes. The available images from the Sentinel-2 spacecraft, obtained from 2016 to 2017, have been used for the spatial analysis of windfall glades. Satellite images of the study area in a combination of channels 11-8-4 have been classified “with training”. The training sample has included a set of pixels representing the image of reference sites where field geobotanical and forest inventory studies have been performed. As a result of image interpretation, it has been revealed that the total area of windfalls in the Kholmsky and Nevelsky Districts of the southwestern part of Sakhalin Island has amounted to 22,735 ha. For the study area, the normalized difference vegetation index (NDVI) has been calculated and its values have been analyzed to isolate areas with varying degrees of damage. At the same time, it has been established that in the southwestern part of Sakhalin, completely or largely dead forest stands occupy 19.85 % of the area, moderately damaged – 41.86 %, and slightly damaged stands account for 38.29 %.

**Keywords:** windfall, extratropical cyclones, satellite images, geoinformation analysis, forest lands, stand, disturbance

**For citation:** Sabirov R.N., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Windfalls in the Forests of the Southwestern Sakhalin under the Influence of Cyclones. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 90–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-90-102>

### Введение

В бореальных лесах часто происходят ветровалы малой интенсивности, что приводит к усложнению морфоструктуры лесных биоценозов [4, 29, 30]. В случае катастрофических ветровалов наносится огромный ущерб лесному хозяйству и экономике в целом [13, 22, 25, 26]. Если в других регионах России катастрофические ветровалы наблюдаются сравнительно редко, раз в 50–70 и более лет [5], то в лесах Дальнего Востока и сопредельных территорий они возникают регулярно во время прохождения различных циклонов или тайфунов, сопровождаемых ураганными ветрами [6, 7, 31].

Тайфуны – это атмосферные вихри, разновидность тропических циклонов, проходящие с мая по ноябрь (не исключены и в другие месяцы) над северо-западной частью Тихого океана [10, 14]. Снижение давления в центральной части некоторых циклонов достигает 895 мбар, при этом устойчивые ветра, возникающие в атмосферном вихре, могут иметь скорость до 50 м/с, а порывы – до 280 км/ч. Прохождение тайфунов над побережьями и островами восточной окраины Евразии сопровождается не только сильными порывистыми ветрами, но и большим количеством осадков. Циклоны в тропических лесах с крупномасштабными ветровалами происходят значительно чаще, чем в бореальной зоне [24, 31]. Тропические циклоны при перемещении к более северным широтам трансформируются во внетропические. Характеристика внетропических циклонов с ураганными ветрами, прошедшими над территорией дальневосточной окраины России и прилегающими к ней островами, сопровождавшихся значительными ветровальными явлениями в лесах, приведена в табл. 1. Эта информация дает представление о возрастании количества случаев смещений траекторий внетропических циклонов на север.

Таблица 1

**Основные характеристики сильных тихоокеанских внетропических циклонов, проследовавших по Дальнему Востоку России [21, 32]**  
**The main characteristics of strong Pacific extratropical cyclones that passed through the Russian Far East [21, 32]**

Тайфун	Даты	Категория SSHWS	Давление в центре, мбар	Скорость устойчивого ветра, м/с	Скорость порывов ветра, м/с
Китти	27.08–2.09.1949	3	952	35–40	57
Эмма	01–11.09.1956	4	930	35–40	69
Элси (Нарсинг)	16–28.09.1969	5	895	45–50	78
Ирвинг	07–18.08.1979	2	955	25–30	42
Филлис	02–05.08.1981	Тропический шторм	975	25–30	38
Джуди	21–26.07.1989	4	910	35–43	57
Мелисса	11–19.09.1994	4	910	35–43	57
Талас	23.08–07.09.2011	Тропический шторм	970	22–27	40
Болавен	19.08–1.09.2012	4	910	45–51	63

Окончание табл. 1

Тайфун	Даты	Категория SSHWS	Давление в центре, мбар	Скорость устойчивого ветра, м/с	Скорость порывов ветра, м/с
Халонг	28.07–5.08.2014	5	915	45–55	72
Чой-ван	01–10.10.2015	Тропический шторм	965	25–31	36
Лайонрок	16–31.08.2016	4	940	35–46	60
Талим	08–22.09.2017	4	935	45–49	61

Наиболее разрушительным среди указанных циклонов, нанесшим огромный ущерб населению и экономике Сахалинской области, был тайфун «Филлис» августа 1981 г. Большое количество осадков, сопровождавшее прохождение этого тайфуна вызвало оползни и обвалы, селевые потоки, катастрофический подъем уровней воды в реках и, следовательно, наводнения, которые уничтожили урожай на огромных площадях сельскохозяйственных угодий, повредили долинным лесам, а также многим объектам инфраструктуры в южной части острова. Среднемасштабные и локальные нарушения лесного покрова на о-ве Сахалине, ставшие следствием других тайфунов, произошедших в прошлые десятилетия, освещены в ряде работ [2, 15]. Кроме этого, при прохождении тайфунов «Халонг» в августе 2014 г. и «Чой-ван» в октябре 2015 г. в юго-западной части острова были уничтожены лесные массивы на значительной площади – названные тайфуны носили уже катастрофический характер.

Целью настоящей работы было исследование масштабов и характера повреждений, полученных лесными насаждениями в результате прохождения внетропических циклонов «Халонг» и «Чой-ван» в юго-западных районах о-ва Сахалина.

#### Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на юго-западе о-ва Сахалина в лесах, в различной степени поврежденных тайфунами 2014–2015 гг. В рассматриваемой части острова зональной лесной растительностью, согласно геоботаническому районированию Сахалина [18], являются темнохвойные леса с преобладанием пихты сахалинской (*Abies sachalinensis* F. Schmidt) и ели аянской (*Picea ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr.) с примесью ряда широколиственных пород. Лесные пожары и промышленные рубки в XX в. значительно изменили коренной состав древостоев, который ранее был представлен в основном пихтово-еловыми лесами. Современные леса – это производные сообщества с доминированием не только темнохвойных пород, но в большей степени березы каменной (*Betula ermanii* Cham.) [27]. В возрастном спектре лесов преобладают средневозрастные и приспевающие древостои. Кроме этого, весьма заметную роль в лесном фонде играют лесные культуры различных хвойных пород. Леса, где проводилось исследование, относятся к Невельскому и Холмскому лесничествам. Преобладают пихтово-еловые и каменноберезовые сообщества (рис. 1). Представленные диаграммы наглядно показывают, что, несмотря на близость территорий и сходство природных условий, породный состав древостоев исследуемых районов заметно отличается: доминирование в количественном отношении темнохвойных пород в Невельском лесничестве связано с меньшим воздействием на эту территорию пожаров и промышленных рубок в XX веке.

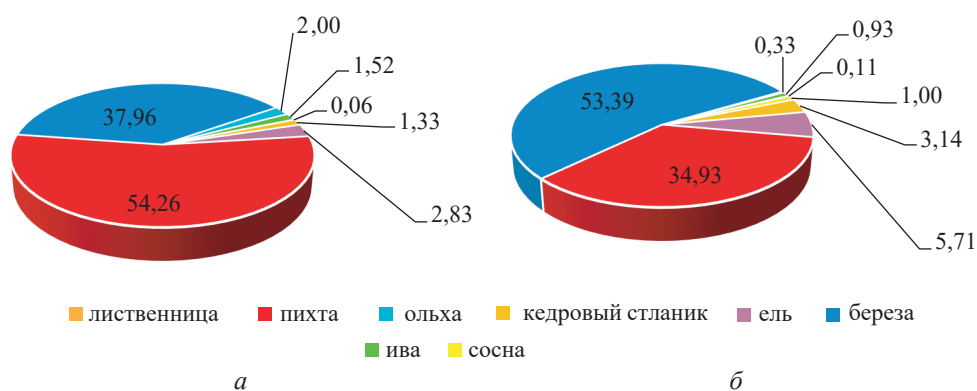


Рис. 1. Породный состав лесов в лесничествах юго-западной части Сахалина, %:  
 а – Невельское лесничество; б – Холмское

Fig. 1. Forest species composition in the forestries of the southwestern part of Sakhalin, %:  
 а – Nevelsky; б – Kholmsky

Наземные полевые исследования лесов на ветровальных участках осуществлялись по известным в лесоведении и лесной таксации методикам [11, 17]. Размеры пробных площадей в зависимости от рельефа конфигурации таксационного выдела и степени нарушений насаждений варьировали от 0,25 до 0,38 га. На каждой пробной площади проводились пересчет деревьев, установление необходимых лесотаксационных характеристик, а затем определение запасов сохранившегося древостоя и его погибшей части. Их суммарные объемы составляли исходный, доветровальный, запас насаждения. Для камеральной обработки данных полевых работ были задействованы региональные нормативно-справочные материалы [12, 16].

При исследованиях изменений лесных территорий широкое распространение получили методы анализа космических снимков [8, 23]. При дистанционном анализе ветровальных прогалов использовались доступные изображения с космического аппарата Sentinel-2 [28]. Для этой цели были отобраны снимки с минимальным количеством облаков, выполненные в летний период 2016 г. (июль–август). Площади, подвергнувшиеся ветровалам, выделены на синтезированных снимках (средний инфракрасный спектр – ближний инфракрасный спектр – зеленый спектр) с выполнением последующей классификации [3]. Обучающая выборка основана на спектральных характеристиках эталонных участков, на которых производились подспутниковые наблюдения (лесотаксационные работы и геоботанические описания). Безлесные территории при обучении выборки не учитывались, и их площадь была исключена из подсчета ущерба от циклонов. Для анализа ветровальных повреждений на исследуемой территории был рассчитан нормализованный относительный индекс растительности [19, 20] и на его основе выделены участки с различной степенью разрушения древостоев.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Тайфуны 2014–2015 гг. в зависимости от типа леса, состава древостоя, экспозиции, крутизны склона, высоты над уровнем моря и других особенностей экотопа оказали на лесной покров юго-западной части о-ва Сахалина

различное воздействие. Соответственно, размеры, строение и конфигурация ветровальных окон или прогалин имеют неоднородный характер. На одних лесных участках рассматриваемой территории произошли массовые ветровалы и буреломы, а на других разрушения коснулись древостоев в средней или меньшей степени (табл. 2).

Таблица 2

**Характер повреждения лесных сообществ ветровалами  
в юго-западной части о-ва Сахалина  
The nature of damage to forest communities by windfalls  
in the southwestern part of Sakhalin Island**

Квар-тал; выдел	Тип леса	Состав древостоя	Вы-сота, м	Диа-метр, см	Воз-раст, лет	Пол-нота	Запас, м <sup>3</sup> /га	Доля (%) гибели древостоя от исходного запаса, по породам
<i>Невельское лесничество</i>								
82; 2	Елово-пихтовый зеленомошный	6П1Е 3Б <sub>к</sub>	19	28	100	0,5	230	П – 47; Е – 40; Б <sub>к</sub> – 4
82; 4		5П1Е 4Б <sub>к</sub>	21	32	120	0,6	310	П – 74; Е – 88; Б <sub>к</sub> – 7
82; 6	Каменноберезняк с курильским бамбуком	7Б <sub>к</sub> 1Р6 2П	16	28	100	0,4	70	Б <sub>к</sub> – 10; Р6 – 0; П – 62
127; 3	Елово-пихтовый зеленомошный	4П3Е 3Б <sub>к</sub>	17	26	80	0,4	160	П – 55; Е – 76; Б <sub>к</sub> – 0
130; 17	Пихтарник с курильским бамбуком	6П3Б <sub>к</sub> 1Брх	18	28	100	0,3	130	П – 59; Б <sub>к</sub> – 3; Брх – 0
131; 1	Елово-пихтовый с курильским бамбуком	6П1Е 2Б <sub>к</sub> 1Ол	16	24	80	0,4	140	П – 74; Е – 85; Б <sub>к</sub> – 8; Ол – 0
132; 11	Елово-пихтовый папоротниковый	5П2Е 3Б <sub>к</sub>	18	32	90	0,5	190	П – 50; Е – 77; Б <sub>к</sub> – 9
<i>Холмское лесничество</i>								
20; 22	Елово-пихтовый с курильским бамбуком	4П3Е 3Б <sub>к</sub>	18	24	90	0,6	250	П – 95; Е – 90; Б <sub>к</sub> – 70 Б <sub>к</sub> – 70
21; 20	Лиственничник папоротниковый (лесные культуры)	8Лц2П	15	18	60	0,7	180	Лц – 93; П – 88
22; 4	Елово-пихтовый папоротниковый	4П1Е 3Б <sub>к</sub> 1Р6 1Брх	14	18	60	0,7	170	П – 64; Е – 62; Б <sub>к</sub> – 50; Р6 – 52; Брх – 60
45; 3	Елово-пихтовый зеленомошный (лесные культуры)	8П2Е	18	22	74	0,7	290	П – 35; Е – 40;
45; 10	Каменноберезняк кустарниковый	6Б <sub>к</sub> 2П 1Лц1Р6	16	20	80	0,5	110	Б <sub>к</sub> – 30; П – 35; Лц – 40; Р6 – 25
46; 8	Елово-пихтовый зеленомошный	7П1Е 1Лц1Б <sub>к</sub>	18	22	90	0,6	240	П – 50; Е – 45; Лц – 35; Б <sub>к</sub> – 30
53; 7	Елово-пихтовый кустарниковый	3Е1П 1Лц5Б <sub>к</sub> ед. Р6	14	16	60	0,5	130	Е – 65; П – 45; Лц – 45; Б <sub>к</sub> – 35

Примечание: П – пихта сахалинская; Е – ель аянская; Б<sub>к</sub> – береза каменная; Р6 – рябина смешанная; Брх – бархат сахалинский; Ол – ольха волосистая; Лц – лиственница Каяндера.

В связи с этим лесные насаждения по степени нарушенности ветровалами были подразделены на 3 категории: полная гибель древостоя или с большой долей погибших деревьев (выше 60 %), в средней степени (30–60 %) и незначительно поврежденные (менее 30 % от исходного количества).

Наибольшее влияние тайфуны оказали на древостой с доминированием темнохвойных пород. Почти на всех участках ель и пихта, независимо от типа леса и условий местопроизрастания, подверглись ветровалам в сильной и средней степени. В частности, доля гибели этих пород в Невельском лесничестве варьировала от 40 до 88 %, а в Холмском лесничестве достигала 90–95 %. Такая высокая уязвимость перед ветровалами ели и пихты обусловлена прежде всего особенностями их корневой системы [1, 9], она является поверхностной и не позволяет им выстоять против ураганных ветров. Наряду с этим береза каменная, имеющая более мощные корни, следовательно, обладая высокой ветроустойчивостью, характеризовалась незначительной долей гибели. Например, в Невельском лесничестве в каменноберезняках (квартал 82, выдел 6) гибель древостоя не превышала 10 %, а у берез темнохвойных лесов ветровальных деревьев оказалось еще меньше (до 9 %).

В Холмском лесничестве доля гибели березы каменной варьировала от 30 до 70 %, рябины смешанной (*Sorbus commixta* Hedl.) – от 25 до 52 %, а бархата сахалинского (*Phellodendron sachalinense* (Fr. Schmidt) Sarg.), обладающего развитой корневой системой, составила 60 %. Даже в лесных культурах лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) с глубокими стержневыми корнями доля погибшей части древостоя достигала 93 % (квартал 21, выдел 20). Такие показатели обусловлены, на наш взгляд, спецификой местных горных ландшафтов: их более крутыми склонами и значительными высотными отметками по сравнению с Невельским районом. Наибольшее разрушительное воздействие ветровалы оказали на древостой, расположенные на крутых верхних частях склонов. Незначительная нарушенность лесных массивов наблюдалась в долинах рек, а также в нижней части пологих горных склонов [15].

Изучение по данным дистанционного зондирования лесов, подверженных катастрофическим ветровалам, показало, что различие между покрытой и непокрытой лесом территорией имеет ярко выраженный характер, поэтому их выявление при дешифрировании спутниковых снимков не вызывает затруднений. Ветровалы, как гари и вырубki, отображаются на синтезированных снимках в красноватых и синеватых оттенках (в комбинации каналов 11–8–4). Вырубki на снимках отличаются по близким к правильным, в основном линейным границам, указывающим на их искусственное происхождение, к тому же в их пределах хорошо просматриваются оставленные семенные куртины, на снимках более высокого разрешения выделяются единичные сохранившиеся во время рубок деревья или их небольшие группы. На гаях в большинстве случаев погибшие деревья отображаются разнонаправленно по территории, наряду с этим хаотично распределяются одиночные сохранившиеся деревья или их куртины. На ветровальных участках вываленные деревья хорошо видны как штрихи, ориентированные главным образом в одном направлении, особенно хорошо выделяющиеся на снимках с высоким разрешением.

Синтезированные космические снимки изучаемой территории подвергались классификации «с обучением». При составлении обучающей выборки на диаграммах рассеивания участки ветровалов достаточно четко обособляются по спектральным характеристикам от других классов. Вместе с тем следует отметить, что по спектральным характеристикам массовые ветровалы проявляют большое сходство с безлесными территориями и рядом других открытых пространств, а также селитебных зон. В связи с этим такие участки были предварительно выделены на снимках и исключены из рассмотрения.

На основе индексных изображений (NDVI) отмечены участки с различной степенью повреждений по структуре и распределению ассимиляционной поверхности, представленной сохранившимися зелеными деревьями и куртинами, а также подлеском и подростом. Геоинформационный анализ пространственного распределения значений NDVI в пределах ветровальных участков позволил выделить повреждения лесонасаждений различного характера от воздействия внетропических циклонов (табл. 3) [15].

Таблица 3

**Характеристика нарушенности лесных массивов юго-западной части о-ва Сахалина**  
**The characteristics of disturbance of forest areas in the southwestern part of Sakhalin Island**

Степень нарушенности лесных массивов, % от общего числа деревьев	Характеристика степени нарушенности	Значение NDVI	Площадь, га	Доля, %
>60 %	Полная или большая доля гибели древостоя	<0,5	4513,61	19,85
60–30	Средняя	0,5–0,6	9515,44	41,86
<30	Незначительная	>0,6	8705,95	38,29
<i>Итого</i>			22 735,00	100

Показано, что нарушенность лесных массивов в результате ветровалов носит различный характер. Наибольшие площади лесов были повреждены в средней степени и составили 9,515 тыс. га (41,86 %). При этом полностью погибшие леса или леса с большим количеством погибших древостоев занимали 19,85 % площади ветровальных участков, а незначительно поврежденные – 38,29 %. В целом на рассматриваемой территории доля лесов, пострадавших от действия циклона в сильной и средней степени, равнялась более 60 %.

Лес на периферии ветровальных пятен, на участках с локальными понижениями рельефа, а также в долинах рек и нижней части горных склонов повреждается в меньшей степени, что хорошо заметно на снимках. После прохождения циклонов вокруг уцелевших групп деревьев – потенциальных источников семян, происходит постепенное зарастание подвергшихся негативному влиянию участков. Однако на юго-западе о-ва Сахалина, где доминируют бамбучниковые типы леса, на участках с уничтоженными деревьями наблюдается интенсивное разрастание курильского бамбука (*Sasa kurilensis* (Rurp.) Makino et Shibata), заметно тормозящего естественные лесовосстановительные процессы.

В результате дешифрирования космических снимков и геоинформационного анализа было выявлено, что суммарная площадь ветровалов в Холмском

и Невельском лесничествах Сахалина составила 22 735 га, или 9,20 %, от лесопокрытой площади. Распределение поврежденных внетропическими циклонами участков леса отражено на рис. 2. Как можно заметить, произошедшие циклоны обусловили ветровалы древостоев на всей юго-западной части о-ва Сахалина, и они носили катастрофический характер.

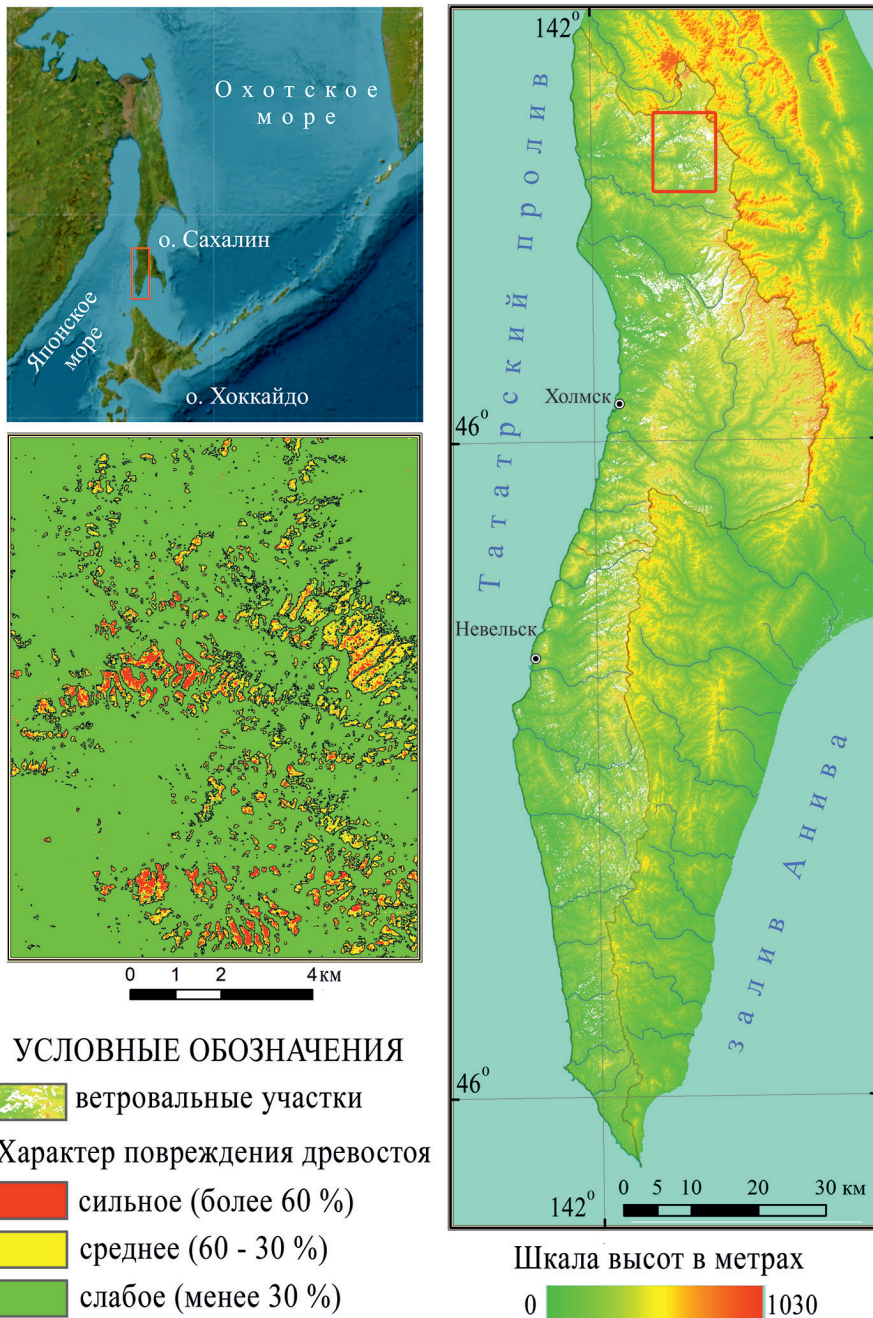


Рис. 2. Поврежденные внетропическими циклонами участки леса (во врезке – характер повреждения древостоя)

Fig. 2. The forest areas damaged by extratropical cyclones (the inset shows the nature of damage to the stand)

### Заключение

Последовательные внетропические циклоны 2014–2015 гг. в юго-западной части о-ва Сахалина обусловили значительные нарушения лесных массивов и массовые ветровалы. Комплексная наземная и дистанционная оценка ветровальных участков позволила установить масштабы и характер повреждений лесов в юго-западной части острова. При этом площадь лесных насаждений с полной или большой долей погибших деревьев составила 4513,61 га, со средней – 9515,44 га и в меньшей степени поврежденных – 8705,95 га. Доля лесов, пострадавших в сильной и средней степени, равнялась более 60 % площади исследованных ветровальных участков.

Степень повреждения лесов внетропическими циклонами зависит от типа леса, состава древостоя и его положения в рельефе. Наибольшее влияние циклоны оказали на древостой с доминированием темнохвойных пород. Почти на всех участках района исследования ель и пихта, независимо от типа леса и условий местопроизрастания, подверглись ветровалам в сильной и средней степени. В большей степени были подвержены ветровалам участки с крутыми склонами, в их средней и верхней частях – для всех пород. В то же время в речных долинах и в нижней части горных склонов отмечалось лишь незначительное повреждение древостоев.

Ветровалы стали причиной сильнейшей трансформации лесных экосистем на значительных пространствах, что проявилось в гибели древостоев, формировании ветровальных окон, а также в изменении состава и структуры нижних ярусов растительного покрова. Общая площадь ветровалов на территории Холмского и Невельского лесничеств составила 22 735 га, или 9,2 %, от их лесопокрытой площади. Масштабы и характер повреждений, вызванных внетропическими циклонами, лесов в юго-западной части о-ва Сахалина позволяют рассматривать изученные циклоны в качестве катастрофических ветровалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агеенко А.С., Васильев Н.Г., Глоба-Михайленко Д.А., Холявко В.С. Древесная флора Дальнего Востока. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 224 с.

Ageenko A.S., Vasil'ev N.G., Globa-Mikhajlenko D.A., Kholyavko V.S. *Arboreal Flora of the Far East*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 224 p. (In Russ.).

2. Братков В.В., Воробьев В.А., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Картографирование динамики растительных сообществ северной части бореальных лесов острова Сахалин на основе данных дистанционного зондирования Земли // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 3(45). С. 6–13.

Bratkov V.V., Vorob'ev V.A., Melkiy V.A., Verkhoturorov A.A. Mapping of Dynamics of Plant Communities of the Northern Part of the Boreal Forests of Sakhalin Island by Remote Sensing Data. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* = Monitoring. Science and Technologies, 2020, no. 3(45), pp. 6–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.45.001>

3. Бучнев А.А., Пяткин В.П. Классификация гиперспектральных данных дистанционного зондирования земли // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 5. С. 536–541.

Buchnev A.A., Pyatkin V.P. Classification of the Hyperspectral Data of the Earth Remote Sensing. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering & Technologies, 2019, vol. 12, no. 5, pp. 536–541. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0109>

4. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность: в 2 кн. / ЦЭПЛ РАН. Кн. 1 / отв. ред. О.В. Смирнова. М.: Наука, 2004. 479 с.

*Eastern European Forests: History in the Holocene and the Present Day*: in 2 books. Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences. Book 1. Ed.-in-chief O. V. Smirnova. Moscow, Nauka Publ., 2004. 479 p. (In Russ.).

5. Георгиевский А.Б. Фаза окон в коренных еловых лесах южной тайги // Ботан. журн. 1992. Т. 77, № 6. С. 52–62.

Georgievskij A.B. Window Phase in the Indigenous Spruce Forests of the Southern Taiga. *Botanicheskij zhurnal* = Botanical Journal, 1992, vol. 77, no. 6, pp. 52–62. (In Russ.).

6. Громько М.Н. Первые результаты изучения катастрофического влияния тайфуна Лайонрок на лесные экосистемы Сихотэ-Алинского заповедника // Тез. докл. XII дальневосточ. конф. по заповедному делу. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН, 2017. С. 35–37.

Gromyko M.N. The First Results of the Study of the Catastrophic Impact of Typhoon Lionrock on the Forest Ecosystems of the Sikhote-Alin Nature Reserve. *Abstracts of the XII Far Eastern Conference on Nature Reserves*. Birobidzhan, Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 35–37. (In Russ.).

7. Иванов А.В., Сало М.А., Бондарчук С.Н., Замолодчиков Д.Г., Могилев А.В., Кочкаркина Н.А. Воздействие ветровалов на структуру и фитомассу древостоев кедровников и березняков Центрального Сихотэ-Алиня // Лесоведение. 2022. № 2. С. 132–143.

Ivanov A.V., Salo M.A., Bondarchuk S.N., Zamolodchikov D.G., Mogileva A.V., Kochkarina N.A. Windfall's Impact on Structure and Phytomass of the Siberian Pine and Birch Forests of the Central Sikhote-Alin. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2022, no. 2, pp. 132–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114822020061>

8. Карпов А.А. Сокращение площади малонарушенных лесных территорий на примере Двинско-Пинежского междуречья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 152–158.

Karpov A.A. Area Reduction of Intact Forest Landscapes on the Example of the Dvina-Pinega Interfluve. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 3, pp. 152–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.152>

9. Леса Дальнего Востока. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 392 с.

*Forests of the Far East*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 392 p. (In Russ.).

10. Мамедов Э.С., Павлов Н.И. Тайфуны. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 140 с.

Mamedov E.S., Pavlov N.I. *Typhoons*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 140 p. (In Russ.).

11. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2002. 240 с.

*Methods of Studying Forest Communities*. St. Petersburg, Institute of Chemistry of the St. Petersburg State University, 2002. 240 p. (In Russ.).

12. Нормативные материалы для таксации лесов Сахалина и Камчатки. Южно-Сахалинск: СахЛОС ДальНИИЛХ, 1986. 814 с.

*Regulatory Materials for the Forest Inventory in Sakhalin and Kamchatka*. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin Forest Experimental Station of the Far Eastern Research Institute of Forestry, 1986. 814 p. (In Russ.).

13. Последствия катастрофического ветровала для лесных экосистем. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 127 с.

*The Consequences of a Catastrophic Windfall for Forest Ecosystems*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 127 p. (In Russ.).

14. Прох Л.З. Словарь ветров. Л.: Гидрометеоиздат. 1983. 311 с.

Prokh L.Z. *Dictionary of Winds*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983. 311 p. (In Russ.).

15. Сабиров Р.Н., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Оценка влияния ветровалов на лесной покров юго-западной части Сахалина с использованием наземных и дистанционных методов // Цифровые технологии в лесном секторе: материалы III Всерос.

науч.-техн. конф.-вебинара. СПб.: С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т им. С.М. Кирова, 2022. С. 83–86.

Sabirov R.N., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Assessing the Impact of Windfalls on Forest Cover in the Southwestern Part of Sakhalin Using Ground-Based and Remote Sensing Methods. *Digital Technologies in the Forestry Sector: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference-Webinar*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, 2022, pp. 83–86. (In Russ.).

16. Справочник для учета лесных ресурсов Дальнего Востока. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2010. 527 с.

*Handbook for Accounting of Forest Resources of the Far East*. Khabarovsk, Far Eastern Research Institute of Forestry Publ., 2010. 527 p. (In Russ.).

17. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: АН СССР, 1961. 144 с.

Sukachev V.N., Sonn S.V. *Methodological Guidelines for the Study of Forest Types*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1961. 144 p. (In Russ.).

18. Толмачев А.И. Геоботаническое районирование острова Сахалина. М.; Л.: АН СССР, 1955. 80 с.

Tolmachev A.I. *Geobotanical Zoning of Sakhalin Island*. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1955. 80 p. (In Russ.).

19. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.

Cherepanov A.S. Vegetation Indices. *Geomatika = Geomatics*, 2011, no. 2, pp. 98–102. (In Russ.).

20. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.

Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral Properties of Vegetation and Vegetation Indices. *Geomatika = Geomatics*, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

21. *Digital Typhoon: Typhoon Images and Information*. Available at: <https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/index.html.en> (accessed 27.06.24).

22. Eriksson M., Pouttu A., Roininen H. The Influence of Windthrow Area and Timber Characteristics on Colonization of Wind-Felled Spruces by *Ips typographus* (L.). *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 216, pp. 105–116.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.044>

23. Karpov A.A. Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3, pp. 83–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-83-92>

24. Korznikov K.A., Kislov D.E., Belyaeva N.G. The First Record of Catastrophic Windthrow in Boreal Forests of South Sakhalin and the South Kurils (Russia) during October 2015 Tropical Cyclones. *Botanica Pacifica*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 31–38.

<https://doi.org/10.17581/bp.2019.08115>

25. Martin T.J., Ogden J. Wind Damage and Response in New Zealand Forests: A Review. *New Zealand Journal of Ecology*, 2006, vol. 30, no. 3, pp. 295–310.

26. Mitchell S.J. Wind as a Natural Disturbance Agent in Forests: A Synthesis. *Forestry*, 2013, vol. 86, iss. 2, pp. 147–157. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps058>

27. Sabirov R.N., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Analysis Transformation of Forests of the Southern Sakhalin by Remote Sensing Data Using Geoinformation Technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012027.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012027>

28. Sentinel Missions. *The European Space Agency*. Available at: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/The\\_Sentinel\\_missions](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions) (accessed 12.08.24).

29. Ulanova N.G. The Effects of Windthrow on Forests at Different Spatial Scales: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 135, iss. 1–3, pp. 155–167.

[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00307-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00307-8)

30. Vodde F., Jõgiste K., Kubota Y., Kuuluvainen T., Köster K., Lukjanova A., Metslaid M., Yoshida T. The Influence of Storm-Induced Microsites to Tree Regeneration Patterns in Boreal and Hemiboreal Forest. *Journal of Forest Research*, 2011, vol. 16, no. 3, pp. 155–167. <https://doi.org/10.1007/s10310-011-0273-6>

31. Vozmishcheva A.S., Bondarchuk S.N., Gromyko M.N., Kislov D.E., Pimenova E.A., Salo M.A., Korznikov K.A. Strong Disturbance Impact of Tropical Cyclone Lionrock (2016) on Korean Pine-Broadleaved Forest in the Middle Sikhote-Alin Mountain Range, Russian Far East. *Forests*, 2019, vol. 10, no. 11. art. no. 1017. <https://doi.org/10.3390/f10111017>

32. Worldwide Tropical Cyclone Centers. *National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. National Oceanic and Atmospheric Administration*. Available at: <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsmc.shtml> (accessed 27.08.24).

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

Научная статья

УДК 574.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-103-120

## Характеристика пигментного комплекса листьев *Betula pendula* Roth. при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона

**Р.Р. Галимов, аспирант;** ResearcherID: [КИН-6235-2024](https://orcid.org/0009-0002-1472-1469),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1472-1469>

**Р.В. Уразгильдин**<sup>✉</sup>, **д-р биол. наук, доц.;** ResearcherID: [К-9714-2018](https://orcid.org/0000-0003-2071-9306),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2071-9306>

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, просп. Октября, д. 69, г. Уфа, Россия, 450054; ramil\_galimov\_98@mail.ru, urv@anrb.ru<sup>✉</sup>

---

Поступила в редакцию 01.11.24 / Одобрена после рецензирования 29.01.25 / Принята к печати 31.01.25

---

**Аннотация.** Представлены результаты исследования пигментного комплекса листьев березы повислой при произрастании в условиях различных типов промышленного загрязнения Южно-Уральского региона: Стерлитамакский промышленный центр (аэротехногенное полиметаллическое загрязнение), Карабашский медеплавильный комбинат (аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом), Учалинский горно-обогатительный комбинат (полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности), Кумертауский бурогольный разрез (полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород бурогольного разреза), Уфимский промышленный центр (аэротехногенное нефтехимическое загрязнение). Показан дисбаланс пигментного комплекса листьев березы для всех исследованных типов загрязнения, который выражается в отсутствии согласованности между адаптивными реакциями пигментов и их соотношений. Четко выделить общую адаптивную реакцию для всего пигментного комплекса в каждом промышленном центре не представляется возможным. С некоторой долей условности можно отметить, что при полиметаллическом загрязнении в сочетании с сернистым ангидридом пигментный комплекс характеризуется преимущественно толерантной адаптивной реакцией, в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности – стрессовой, в условиях отвалов вскрышных пород бурогольной горнорудной промышленности – нейтральной, а при нефтехимическом и аэротехногенном полиметаллическом загрязнении преобладающая реакция отсутствует. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промышленные центры образуют ряд по возрастанию: Кумертауский бурогольный разрез – Учалинский горно-обогатительный комбинат – Карабашский медеплавильный комбинат – Стерлитамакский промышленный центр – Уфимский промышленный центр. Соотношение хлорофилла *a* и *b* определяет устойчивый баланс между хлорофиллами во всех типах загрязнения, но выделяет нефтехимическое загрязнение как более значимый стрессовый фактор. Соотношение хлорофилла *a + b* и каротиноидов показывает отсутствие стабильности во всех типах загрязнения и выделяет аэротехногенное полиметаллическое, нефтехимическое и полиметаллическое загрязнения в условиях медно-колчеданных отвалов как более значимые стрессовые факторы. Разработка рекомендаций по применению березы для защитных насаждений должна быть основана на комплексной

оценке ее адаптивных реакций на различных иерархических уровнях. Это позволит целенаправленно использовать березу в условиях, где она толерантна к загрязнению и обладает высоким адаптивным потенциалом, и исключить ее применение в посадках в стрессовых условиях, где ее приспособительные возможности ограничены.

**Ключевые слова:** береза повислая, пигментный комплекс листьев, адаптивные реакции, промышленное загрязнение, Южно-Уральский регион

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания № 075-00570-24-01 по теме № 123020700152-5 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов». Использована приборная база Центра коллективного пользования «Агидель».

**Для цитирования:** Галимов Р.Р., Уразгильдин Р.В. Характеристика пигментного комплекса листьев *Betula pendula* Roth. при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 103–120.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-103-120>

Original article

## Characteristics of the Pigment Complex of *Betula pendula* Roth. Leaves in Different Types of Pollution in the South Ural Region

**Ramil R. Galimov**, Postgraduate Student; ResearcherID: [KIH-6235-2024](https://orcid.org/0009-0002-1472-1469),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1472-1469>

**Ruslan V. Urazgildin**<sup>✉</sup>, Doctor of Biological Science, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [K-9714-2018](https://orcid.org/0000-0003-2071-9306), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2071-9306>

Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, prosp. Oktyabrya, 69, Ufa, 450054, Russian Federation;

[ramil\\_galimov\\_98@mail.ru](mailto:ramil_galimov_98@mail.ru), [urv@anrb.ru](mailto:urv@anrb.ru)<sup>✉</sup>

---

Received on November 1, 2024 / Approved after reviewing on January 29, 2025 / Accepted on January 31, 2025

---

**Abstract.** The article presents the results of a study of the pigment complex of silver birch leaves growing under conditions of various types of industrial pollution in the South Ural Region. Those are Sterlitamak Industrial Centre (aerotechnogenic polymetallic pollution), Karabash Copper Smelting Plant (aerotechnogenic polymetallic pollution in combination with sulfur dioxide), Uchaly Mining and Processing Plant (polymetallic pollution in the conditions of overburden rock dumps of the copper-pyrite mining industry), Kumertau Brown Coal Mine (polymetallic pollution in the conditions of overburden rock dumps of the brown coal mine), Ufa Industrial Centre (aerotechnogenic petrochemical pollution). An imbalance in the pigment complex of birch leaves is shown for all the types of pollution studied, which is expressed in the lack of consistency between the adaptive responses of pigments and their ratios. It is not possible to clearly identify the overall adaptive response for the entire pigment complex in each industrial centre. With a certain degree of conventionality, it can be noted that in the case of polymetallic pollution in combination with sulfur dioxide, the pigment complex is characterized by a predominantly tolerant adaptive reaction, in the conditions of overburden rock dumps of the copper-pyrite mining industry – a stressful one, in the conditions of overburden rock dumps of the brown coal mining industry – a neutral one, and in the case of petrochemical and aerotechnogenic polymetallic pollution, there is no predominant reaction. According to the degree of increasing imbalance in the pigment complex, the indus-

trial centres form a series in an ascending order: Kumertau Brown Coal Mine – Uchaly Mining and Processing Plant – Karabash Copper Smelting Plant – Sterlitamak Industrial Centre – Ufa Industrial Centre. The ratio of chlorophyll *a* and *b* determines a stable balance between chlorophylls in all types of pollution, but highlights petrochemical pollution as a more significant stress factor. The ratio of chlorophyll *a* + *b* and carotenoids shows a lack of stability in all types of pollution and highlights aerotechnogenic polymetallic, petrochemical and polymetallic pollution in the conditions of copper-pyrite dumps as more significant stress factors. The development of recommendations for the use of birch for protective plantations should be based on a comprehensive assessment of its adaptive responses at various hierarchical levels. This will make possible the targeted use of birch in conditions where it is tolerant to pollution and has a high adaptive potential, and will exclude its use in plantations in stressful conditions where its adaptive capabilities are limited.

**Keywords:** silver birch, pigment complex of leaves, adaptive reactions, industrial pollution, South Ural Region

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment no. 075-00570-24-01 on the topic no. 123020700152-5 “Sustainability of Forest-Forming Tree Species and Ecological and Biological Adaptation, Taking into Account the Anthropogenic Transformation of Landscape and Natural Complexes”. The work used the instrument base of the “Agidel” Collective Use Centre.

**For citation:** Galimov R.R., Urazgildin R.V. Characteristics of the Pigment Complex of *Betula pendula* Roth. Leaves in Different Types of Pollution in the South Ural Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 103–120. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-103-120>

### Введение

Южно-Уральский регион является районом расположения большого количества промышленных центров со значительным количеством загрязнителей в составе выбросов. Постоянный рост числа техногенных загрязнителей оказывает противоречивое влияние на растительные организмы, в т. ч. и на пигментный комплекс древесных растений – биофильтров, растущих вблизи предприятий. Роль листьев древесных растений не ограничивается осаждением промышленной пыли, они также поглощают токсиканты и включают их в собственный метаболизм. Данное обстоятельство существенно затрагивает фотосинтез как наиболее уязвимый к внешним воздействиям физиологический процесс. В связи с этим анализ адаптивных реакций пигментного комплекса представляет ценность для прогнозирования продуктивности древесных видов и оценки целесообразности их использования в качестве буферных насаждений [28].

Основным пигментом, преобразующим световую энергию в химическую, является хлорофилл, ведущая роль при этом принадлежит хлорофиллу *a*. Вспомогательный пигмент хлорофилл *b* передает энергию на хлорофилл *a*, компенсируя недостаточное освещение, а каротиноиды поглощают свет в синей спектральной области и защищают пигментную систему от фотоокисления [11, 12, 30, 32, 34]. Под воздействием промышленных загрязнителей в пигментном аппарате растений происходят нарушения: набухание хлоропластов, дезорганизация их мембранной системы, снижение синтеза и активности хлорофилла. Фотосинтез также ингибируется из-за увеличения синтеза абсцизовой кислоты [3, 4, 6, 16]. Механизм действия поллютантов зависит от многих факторов, но, несмотря на различную чувствительность видов к ним, общей реакцией являет-

ся разрушение пигментов, что позволяет использовать соотношения хлорофилла  $a$  и  $b$  и хлорофилла  $a + b$  и каротиноидов в качестве маркеров загрязнения и толерантности к нему растений [7, 8, 21].

Анализ публикаций последних 20 лет выявляет существенные пробелы в изучении пигментного комплекса древесных растений в условиях техногенеза. Исследования на отвалах горнорудной промышленности крайне малочисленны, причем в них констатируется подавление содержания пигментов [25]. В то же время влияние промышленных предприятий и автотранспорта освещено широко, при этом в научной литературе сложилось 2 противоположных направления в интерпретации данных: одни авторы указывают на негативное воздействие загрязнения [1, 2, 8, 14, 18, 26, 31, 33, 36–38], другие – на положительное [13, 19, 21, 29, 39]. В редких случаях признается отсутствие строгих закономерностей [35]. Почти в каждой работе, наряду с декларируемыми стрессовыми реакциями, описаны толерантные, и наоборот. Несмотря на то, что все авторы сходятся во мнении об адаптивной природе выявленных реакций, их качественная оценка (направленность адаптации) остается нераскрытой. Кроме того, отсутствуют сравнительные исследования для одного вида по стандартной методике в условиях разных типов загрязнения. Восполнение этих пробелов определяет актуальность и новизну нашего исследования.

Настоящая работа направлена на сравнительный анализ воздействия разных видов аэротехногенного загрязнения и отвалов горнорудной промышленности в Южно-Уральском регионе на пигментный аппарат листьев березы повислой с последующей качественной оценкой адаптивных реакций. Задачи: выбрать промышленные центры с контрастными типами загрязнения, а также древостои березы повислой со сходными таксационными характеристиками в зонах загрязнения и на контрольных участках; собрать материал, выполнить его лабораторный анализ, статистическую обработку и интерпретацию полученных данных.

#### *Объекты и методы исследования*

В Южно-Уральском регионе в качестве полигонов для исследования выбраны 5 промышленных центров, характеризующихся разными типами загрязнения [9, 17]: Стерлитамакский промышленный центр (СПЦ) – аэротехногенное полиметаллическое загрязнение; Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) – аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом; Учалинский горно-обогатительный комбинат (УГОК) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности; Кумертауский бурогольный разрез (КБР) – полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород бурогольного разреза; Уфимский промышленный центр (УПЦ) – аэротехногенное нефтехимическое загрязнение. В каждом промышленном центре в зависимости от розы ветров подобраны древостои в импактной зоне и в контроле (рис. 1).

В качестве объекта исследования выступила береза повислая (*Betula pendula* Roth.) – пионерный лесобразующий вид Предуралья, отличающийся быстрым ростом и высокой экологической пластичностью, что обусловило ее распространение во всех изучаемых промышленных центрах [20, 24]. Согласно

нашим данным (табл. 1), таксационные показатели древостоев в зонах загрязнения и на контрольных участках СПЦ, КМК и УПЦ являются сопоставимыми, что подтверждает правильность подбора участков. В свою очередь, различия, отмеченные для УГОК и КБР, связаны с возрастной неоднородностью: древостои на отвалах сформировались в конце XX в. после завершения отсыпки отвалов, тогда как контрольные участки представлены более старыми посадками. В связи с этим для контроля были выбраны наиболее молодые доступные насаждения. Важно отметить, что во всех промцентрах запас древостоев в условиях загрязнения примерно на  $100 \text{ м}^3/\text{га}$  ниже контрольных значений, что свидетельствует об осязаемом снижении их продуктивности в импактной зоне.

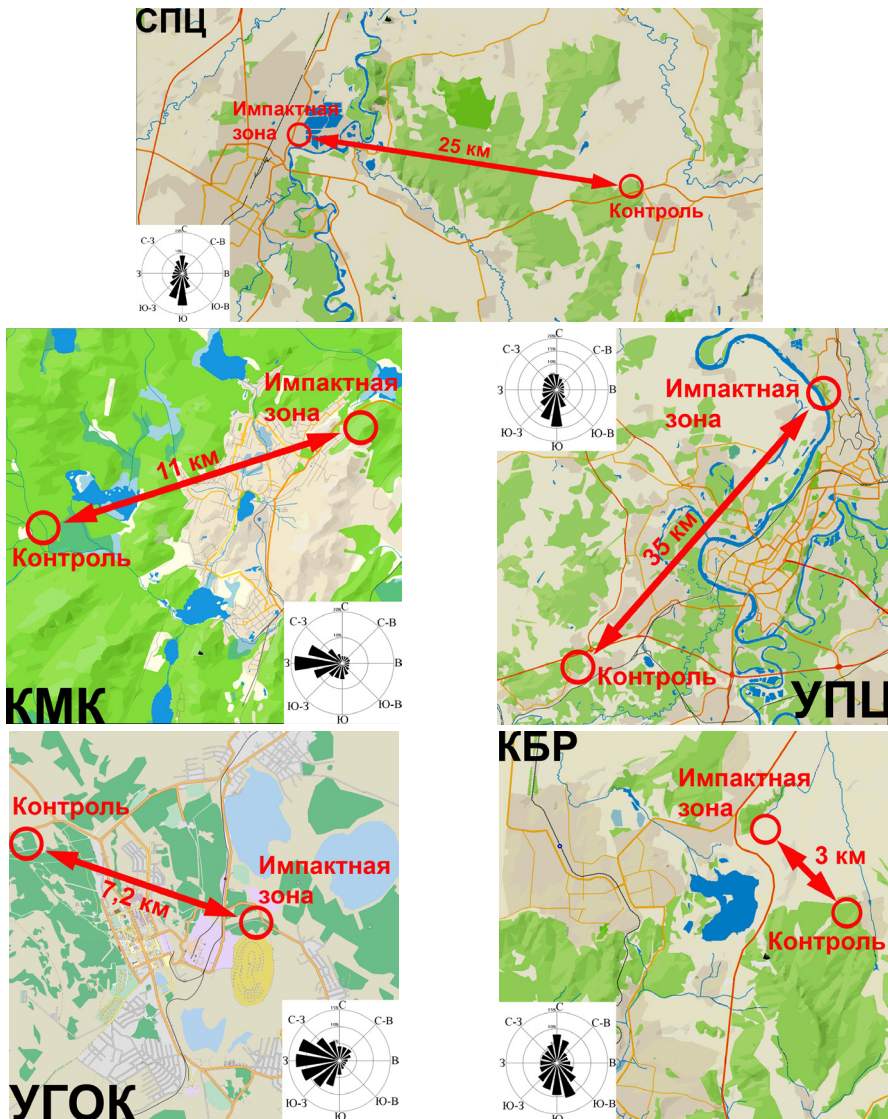


Рис. 1. Схема промышленных центров Южно-Уральского региона с выделением пробных площадей в импактной зоне и в контроле с учетом годовой розы ветров (<https://ru.meteocast.in>) [5]

Fig. 1. The map of industrial centres of the South Ural Region with the allocation of sample plots in the impact and control zone, taking into account the annual wind rose (<https://ru.meteocast.in>) [5]

Таблица 1

## Краткая таксационная характеристика древостоев [5]

## The brief inventory characteristics of the stands [5]

Промышлен- ный центр	Местопо- ложение древостоя	Состав древостоя	Среднее			Полно- та	Запас, м³/га
			возраст, лет	диаметр, см	высо- та, м		
СПЦ	Промзона	9Б1ТЧ	30	27	26	0,6	312,32
	Контроль	9Б1Д+ОС	26	27	26	0,6	408,56
КМК	Промзона	10Б	70	23	24	0,6	377,22
	Контроль		65	21	30	0,8	491,12
УГОК	Промзона	5Б5С	30	12	14	0,6	327,30
	Контроль	10Б	50	31	32	0,6	341,00
КБР	Промзона	7С3Б	20	15	18	0,8	187,04
	Контроль	10Б	40	33	30	0,7	627,48
УПЦ	Промзона		5ЛП5Б+В+Д	36	36	30	0,8
	Контроль	40		28	27	0,6	582,04

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) определяли спектрофотометрическим методом [15, 27]. Отбор листьев 1-й генерации проводили в конце июля с 11:00 до 12:00, что соответствует пиковой концентрации пигментов. Пробы отбирали в полевых условиях с нижней части кроны 10 модельных деревьев, имеющих средние таксационные показатели. С каждого дерева брали по 1 конечному листу с побега текущего года. Для приготовления объединенной пробы из центральной части всех собранных листьев делали высеки, которые затем измельчали и смешивали с последующим получением 10 навесок массой по 0,1 г каждая с использованием высокоточных электронных весов Diamond (точность – ±0,001 г). Каждую навеску заливали 10 мл 96 % этанола и экстрагировали в условиях полного затемнения в течение 12 ч для предотвращения фоторазложения пигментов. Измерения оптической плотности выполняли на спектрофотометре КФК-5М (Россия). Содержание пигментов в листьях рассчитывали в 2 этапа по формулам:

I этап – установление концентрации пигментов листьев в спиртовом растворе (мг/л):

$$C_{\text{хл}a} = 13,7D_{665} - 5,76D_{649};$$

$$C_{\text{хл}b} = 25,8D_{649} - 7,6D_{665};$$

$$C_{\text{кар}} = 4,6957D_{440,5} - 0,268(C_{\text{хл}a} + C_{\text{хл}b}),$$

где  $C_{\text{хл}a}$ ,  $C_{\text{хл}b}$ ,  $C_{\text{кар}}$  – концентрация хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов;  $D_{665}$ ,  $D_{649}$  и  $D_{440,5}$  – оптическая плотность спиртового раствора при соответствующих длинах волн (665, 649 и 440,5 нм).

II этап – нахождение количества пигментов в листьях (мг/г сырой массы):

$$A = \frac{VC}{1000P},$$

где  $V$  – объем спиртовой вытяжки (10 мл);  $C$  – концентрация пигментов в спиртовом растворе (мг/л);  $P$  – навеска растительного материала (0,1 г).

На основе полученных количественных данных были рассчитаны интегральные показатели: соотношения хлорофиллов *a* и *b* и суммы хлорофиллов

*a* и *b* к каротиноидам. Статистическая значимость различий между опытными и контрольными группами оценивалась с помощью *t*-критерия Стьюдента. Классификация адаптивных реакций пигментного комплекса проводилась согласно методике Р.В. Уразгильдина [22]. В соответствии с данным подходом, к стрессовым реакциям относят: снижение содержания хлорофиллов *a* и *b*, компенсаторный рост уровня каротиноидов, а также уменьшение соотношений хлорофилла *a* и *b* и хлорофиллов *a + b* и каротиноидов, что отражает компенсаторный рост долей вспомогательных пигментов. Статистически достоверные и выраженные реакции такого характера идентифицированы как стрессовые, противоположные им – как толерантные. Незначительные или статистически недостоверные изменения относили к умеренно-стрессовым и умеренно-толерантным реакциям соответственно, а отсутствие изменений – к нейтральным. Статистическая обработка данных выполнена стандартными для биологических исследований методами с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2010 и Statistica 6.0.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны изменения в содержании пигментов в листьях березы на импактных и контрольных участках для различных типов промышленного загрязнения Южно-Уральского региона.

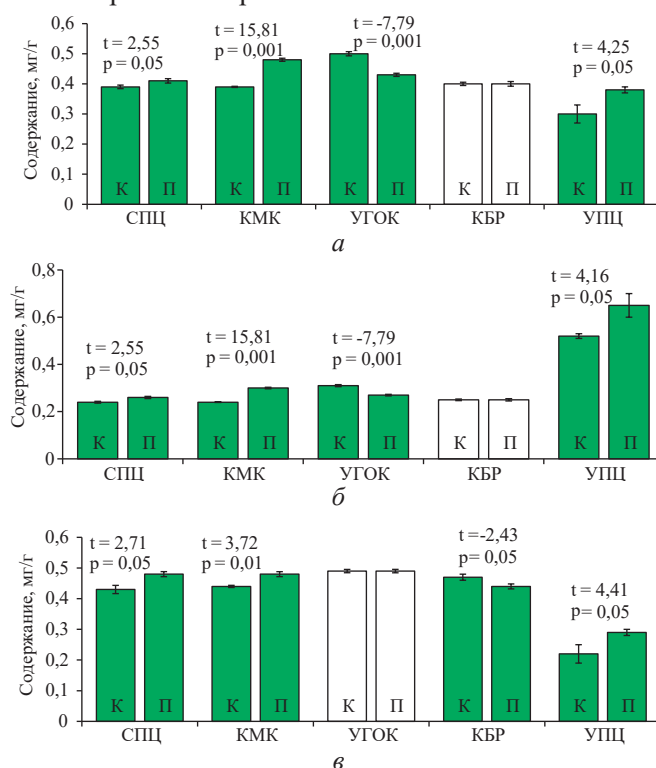


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* (а), хлорофилла *b* (б) и каротиноидов (в) в условиях контроля и промышленных центров (К – контроль; П – промышленный центр; ■■, □□ – различия по критерию Стьюдента достоверны и недостоверны соответственно; *t* – критерий Стьюдента, *p* – уровень значимости)

Fig. 2. The contents of chlorophyll *a* (а), chlorophyll *b* (б) and carotenoids (в) under control and industrial centre conditions (К – control; П – industrial centre; ■■, □□ – significant and insignificant differences according to the Student's *t*-test, respectively; *t* – Student's *t*-test; *p* – level of significance)

Анализ динамики хлорофиллов выявил синхронный характер изменений содержания хлорофиллов  $a$  и  $b$  во всех исследуемых промцентрах: статистически достоверное увеличение концентраций обоих пигментов отмечено в условиях КМК (на 0,09 и 0,06 мг/г соответственно) и УПЦ (на 0,08 и 0,13 мг/г соответственно). В СПЦ зафиксирован незначительный, но достоверный прирост (на 0,02 мг/г для каждого пигмента). Противоположная тенденция наблюдалась на участке УГОК, где содержание хлорофиллов достоверно снизилось (на 0,07 и 0,04 мг/г соответственно), тогда как для КБР различий с контролем не выявлено. Реакция каротиноидов имела иную направленность. Их содержание достоверно возросло в зоне влияния СПЦ (на 0,05 мг/г), КМК (на 0,04 мг/г) и УПЦ (на 0,07 мг/г). В КБР, напротив, зафиксировано значительное уменьшение уровня каротиноидов (на 0,03 мг/г), а на участке УГОК различия с контролем не выявлены.

Соотношение пигментов характеризуется следующими закономерностями (табл. 2).

Таблица 2

**Соотношение пигментов в листьях березы повислой  
в условиях различных типов загрязнения  
The ratio of pigments in the leaves of silver birch under conditions  
of different types of pollution**

Промышленный центр	Хлорофилл $a/b$		Хлорофилл $a + b$ / каротиноиды	
	контроль	промзона	контроль	промзона
СПЦ	1,6±0	1,6±0	1,5±0,03	1,4±0,04
КМК	1,6±0	1,6±0	<b>1,4±0,01</b>	<b>1,6±0,04</b>
УГОК	1,6±0	1,6±0	<b>1,7±0,04</b>	<b>1,4±0,02</b>
КБР	1,6±0	1,6±0	1,4±0,03	1,5±0,06
УПЦ	0,6±0	0,6±0	<b>4,7±0,02</b>	<b>4,3±0,04</b>

Примечание: Жирным шрифтом выделены достоверные различия между контролем и промзоной.

Стабильность соотношения хлорофиллов  $a$  и  $b$  во всех промышленных центрах относительно контроля указывает на устойчивость хлорофиллового комплекса и тесную функциональную связь между пигментами. Однако выявлена специфика для разных типов загрязнения: в УПЦ зафиксировано преобладание хлорофилла  $b$  над хлорофиллом  $a$ , тогда как в остальных промцентрах наблюдается обратная ситуация. Это позволяет заключить, что полиметаллическое аэротехногенное загрязнение и условия отвалов вскрышных пород не угнетают синтез хлорофилла  $a$ , в отличие от нефтехимического загрязнения, которое стимулирует компенсаторное увеличение доли хлорофилла  $b$ . Динамика соотношения хлорофилл ( $a + b$ ) / каротиноиды не имеет однозначной тенденции: показатель возрастает на участках КМК (значительно) и КБР (незначительно), но снижается для СПЦ (незначительно), УГОК и УПЦ (значительно). Падение данного индекса в условиях нефтехимического загрязнения и медно-колчеданных отвалов свидетельствует о стрессовом воздействии, выражающемся в уменьшении доли хлорофиллов на фоне компенсаторного роста каротиноидов. Напротив, в буроугольных отвалах и при полиметаллическом загрязнении с примесью сернистого ангидрида доля хлорофиллового комплекса увеличивается. Сравнение промцентров показывает, что для УПЦ доля хло-

рофиллов в 3 раза превышает показатели для других типов загрязнения, это обусловлено высоким содержанием хлорофилла  $b$  и низким – каротиноидов у деревьев на территории УПЦ.

На основании полученных данных проведена классификация адаптивных реакций пигментного комплекса березы повислой в условиях различных типов загрязнения Южного Урала (табл. 3). Степень реализации адаптивного потенциала вида проявляется в специфических сочетаниях адаптивных реакций:

СПЦ: комплекс адаптивных реакций характеризуется умеренно-толерантными (увеличение хлорофиллов  $a$  и  $b$ ) стрессовой (рост каротиноидов), умеренно-стрессовой (снижение соотношения хлорофилл  $a + b$  / каротиноиды) и нейтральной (стабильность соотношения хлорофиллов) реакциями;

КМК: наблюдается выраженная преимущественно толерантная адаптивная реакция (значительный рост хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и соотношения хлорофилл  $a + b$  / каротиноиды), притом что повышение уровня каротиноидов указывает на стрессовую, а стабильность соотношения хлорофиллов – на нейтральную реакции;

УГОК: преобладает стрессовая адаптивная реакция (снижение количества хлорофиллов  $a$ ,  $b$  и их соотношения с каротиноидами) при нейтральных реакциях каротиноидов и соотношения хлорофиллов;

КБР: доминируют нейтральные адаптивные реакции (стабильность хлорофиллов и их соотношения) при наличии толерантной (снижение содержания каротиноидов) и умеренно-толерантной (увеличение соотношения хлорофилл  $a + b$  / каротиноиды) реакций;

УПЦ: отмечается смешанный ответ – толерантные адаптивные реакции хлорофиллов  $a$  и  $b$  сочетаются со стрессовыми реакциями каротиноидов и соотношения пигментов с каротиноидами при нейтральной реакции соотношения хлорофиллов.

Таблица 3

**Адаптивные реакции пигментного комплекса листьев березы повислой  
в условиях различных типов загрязнения  
The adaptive reactions of the pigment complex of silver birch leaves  
under conditions of different types of pollution**

Промышленный центр	Хлорофилл		Каротиноиды	Хлорофилл $a/b$	Хлорофилл $a + b$ / каротиноиды
	$a$	$b$			
СПЦ	↑ УТ	↑ УТ	↑↑ С	(-) Н	↓ УС
КМК	↑↑ Т	↑↑ Т	↑↑ С	(-) Н	↑↑ Т
УГОК	↓↓ С	↓↓ С	(-) Н	(-) Н	↓↓ С
КБР	(-) Н	(-) Н	↓↓ Т	(-) Н	↑ УТ
УПЦ	↑↑ Т	↑↑ Т	↑↑ С	(-) Н	↓↓ С

Примечание: Реакции пигментов и соотношений: С – стрессовая; УС – умеренно-стрессовая; Н – нейтральная; УТ – умеренно-толерантная; Т – толерантная. Изменение содержания пигментов и их соотношений в промцентрах относительно контроля: ↑↑ – значительное и достоверное увеличение; ↑ – незначительное или недостоверное увеличение; (-) – изменения отсутствуют; ↓ – незначительное или недостоверное уменьшение; ↓↓ – значительное и достоверное уменьшение.

Проведенный анализ выявил нарушение сбалансированности пигментного комплекса листьев березы во всех исследованных промышленных центрах,

что проявляется в отсутствии единой направленности адаптивных реакций отдельных пигментов и их соотношений. Вследствие этого идентифицировать доминирующий тип адаптивной реакции для пигментного комплекса не представляется возможным. Тем не менее с определенной долей условности можно констатировать, что в условиях КМК реакции носят преимущественно толерантный характер, в УГОК – стрессовый, а в КБР пигментный комплекс демонстрирует в целом нейтральную реакцию на загрязнение. В УПЦ наблюдается равное превалирование толерантных и стрессовых адаптивных реакций, тогда как в СПЦ 4 адаптивные реакции проявляются относительно независимо. То есть выделить преобладающий тип адаптивной реакции для каждого из промцентров также нельзя. Однако одновременное наличие специфических и неспецифических реакций указывает на гибкость реакции пигментного комплекса березы на стрессовые факторы. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промцентры образуют ряд по возрастанию: КБР – УГОК – КМК – СПЦ – УПЦ.

Сравнительный анализ показал, что соотношение хлорофиллов *a* и *b* сохраняет стабильность как в фоновых условиях, так и под воздействием загрязнения. При этом в УПЦ наблюдается преобладание хлорофилла *b* над хлорофиллом *a*, тогда как в остальных промцентрах доминирует хлорофилл *a*. Эта особенность позволяет рассматривать нефтехимическое загрязнение как наиболее стрессовый фактор среди остальных. В отличие от стабильного соотношения хлорофиллов, баланс между хлорофиллами и каротиноидами нарушается во всех промышленных центрах. На участках СПЦ, УГОК и УПЦ зафиксировано снижение доли хлорофиллов при одновременном росте количества каротиноидов, тогда как для КМК и КБР отмечена противоположная динамика. Такая реакция указывает на повышенную стрессовую нагрузку для растений при аэротехногенном полиметаллическом, нефтехимическом загрязнении и в условиях медно-колчеданных отвалов.

Анализ публикаций последних лет свидетельствует о том, что, несмотря на обширный материал по реакциям пигментного комплекса древесных, травянистых и кустарниковых растений на промышленное загрязнение, отсутствует качественная оценка выявленных адаптивных реакций. В связи с этим для сопоставления с собственными результатами авторами были проанализированы не только выводы, но и первичные данные (таблицы, графики) из рассматриваемых работ. Такой подход обусловил в некоторых случаях расширенную интерпретацию литературных данных по сравнению с первоисточниками. Этот анализ позволяет выделить 2 положения: существенный пробел в исследованиях пигментного комплекса растений на отвалах горнорудной промышленности; поляризацию мнений относительно влияния техногенеза на пигментный комплекс растений.

Единичные работы, такие как исследование породного отвала «Южный» Кедровского угольного разреза, демонстрируют значительное угнетение синтеза хлорофиллов у березы повислой при менее выраженном снижении уровня каротиноидов. Авторы рассматривают специфическое соотношение пигментов (3-кратное преобладание хлорофилла *a* над хлорофиллом *b* и 2-кратное – суммы хлорофиллов над каротиноидами) как признак толерантной адаптации [25]. Полученные нами результаты лишь частично согласуются с этими данными. Сходство наблюдается лишь в подавлении хлорофиллов в УГОК и каротиноид-

дов в КБР, что, вероятно, обусловлено принципиальными различиями в составе почвогрунтов (аргиллиты, алевролиты и песчаники на отвале «Южный» против геохимических условий исследованных нами промцентров). Частичную аналогию можно провести с результатами изучения загрязнения р. Митхи (Мумбаи, Индия), где виды растений классифицированы на индикаторные (снижение пигментов), толерантные (их увеличение) и без четкой тенденции [34]. Согласно этой системе, береза в УГОК может быть отнесена к индикаторам, а в КБР – к видам с неоднозначной реакцией. Однако данная классификация не учитывает разнонаправленности реакций хлорофиллов и каротиноидов, что является ключевым в нашей работе.

Значительная часть исследований фиксирует негативные последствия. Например, в условиях г. Арзамаса отмечено подавление хлорофиллов, особенно хлорофилла *a*, у липы, тополя и ивы на фоне роста доли каротиноидов [38]. Аналогично вследствие загрязнения в Иркутско-Черемховской промышленной зоне снижается содержание всех пигментов в хвое сосны, хотя соотношения пигментов и суммы пигментов к каротиноидам возрастают [33]. В Ярославле повышение концентрации поллютантов коррелирует с уменьшением количества хлорофиллов и ростом каротиноидов у березы, липы и тополя [14].

Исследования в зоне влияния УПЦ демонстрируют видоспецифичность реакций пигментного аппарата древесных растений на нефтехимическое загрязнение. У березы повислой в фазе активной вегетации отмечен рост концентрации всех фотосинтетических пигментов. У липы мелколистной зафиксировано увеличение содержания хлорофилла *a* при одновременном снижении хлорофилла *b* и каротиноидов. У дуба черешчатого наблюдалось уменьшение количества хлорофиллов на фоне возрастания долевого участия каротиноидов. Соотношение хлорофиллов *a* и *b* у березы и дуба было стабильно на протяжении всего вегетационного периода, в то время как у липы в условиях загрязнения зарегистрировано значительное увеличение уровня хлорофилла *a* относительно хлорофилла *b*. Общей закономерностью для всех 3 видов стало перераспределение пигментного фонда в сторону увеличения доли каротиноидов при относительном снижении количества хлорофиллов [23].

Исследования в промышленной зоне Паневник (Польша) позволяют отметить видоспецифичность реакции хвойных на техногенное загрязнение. Установлено, что содержание хлорофиллов в хвое текущего года снижается у сосны веймутовой и сосны черной, тогда как у псевдотсуги и сосны обыкновенной наблюдается противоположная тенденция. При этом для некоторых видов зафиксирована возрастная динамика: увеличение концентрации пигментов регистрируется в 1-летней хвое сосны веймутовой и сосны обыкновенной, а также в 2-летней хвое сосны черной [31].

Значительное количество исследований посвящено изучению воздействия автотранспортных выбросов на пигментный аппарат древесных растений. В частности, установлено, что в г. Барыш автомобильные эмиссии приводят к снижению содержания пигментов у березы, при этом наиболее существенно угнетаются хлорофилл *b* и общее содержание хлорофиллов [1]. Аналогичная тенденция наблюдается в г. Красноярске, где в хвое ели под воздействием автотранспорта концентрации хлорофиллов и каротиноидов снижаются в 3,0; 3,5 и 3,6 раза соответственно, с сохранением доминирования хлорофилла *a* над хлорофиллом *b* [10]. Исследования в г. Кемерово демонстрируют градиентный

характер воздействия загрязнения: на наиболее подверженном такому негативному влиянию участке отмечается подавление хлорофилла *b* на 20–30 % при незначительном снижении хлорофилла *a* (до 10 %) без изменения уровня каротиноидов у рябины сибирской и березы повислой, тогда как на менее загрязненной территории угнетение всех пигментов значительно усиливается [26]. В г. Курске выявлена разнонаправленная динамика: содержание хлорофилла *a* и каротиноидов снижается (в 3 и 2,5 раза соответственно) с приближением к автодороге, в то время как концентрация хлорофилла *b* демонстрирует скачкообразные изменения при том, что в импактной зоне отличия по отношению к контролю отсутствуют [2]. Данные по г. Барнаулу подтверждают избирательное воздействие автомобильных выбросов на пигменты с наибольшим подавлением хлорофилла *a* (на 58–64 %) по сравнению с хлорофиллом *b* (на 22–36 %) и каротиноидами (на 38–48 %) [18]. Исследования в индийских городах Самбалпур [37] и Варанаси [36] показывают сходную реакцию пигментного аппарата растений на автотранспортное загрязнение: в обоих случаях отмечается избирательное подавление хлорофилла *b* и каротиноидов, содержание которых снижается более чем в 2 раза по сравнению с хлорофиллом *a*, также выявлена корреляция между уровнем загрязнения и избирательным подавлением отдельных пигментных комплексов.

Лишь в работах [2, 14, 18, 38] описаны стрессовые адаптивные реакции на промышленное и автотранспортное загрязнение. В большинстве исследований, несмотря на декларируемое авторами негативное воздействие загрязнения, представлены смешанные реакции, включающие, наряду со стрессовыми, и толерантные компоненты. Полученные нами данные согласуются с этой тенденцией: в условиях УГОК доминирование стрессовых реакций сочетается с наличием нейтральных адаптивных ответов.

Другие исследования свидетельствуют о стимулирующем влиянии техногенного загрязнения на пигментный аппарат растений. В г. Калининграде отмечено увеличение содержания хлорофиллов, антоцианов и каротиноидов в листьях рябины, липы, клена и ели, при этом между хлорофиллами и каротиноидами установлена обратная зависимость [13]. В зоне воздействия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса в хвое сосны и ели повышаются уровень хлорофиллов и соотношение хлорофиллов *a* и *b*, тогда как динамика количества каротиноидов и отношения хлорофиллов к каротиноидам имеют видоспецифический характер: первое увеличивается у сосны при снижении у ели, а второе, наоборот, повышается у ели при уменьшении у сосны [21]. Исследования в г. Красноярске выявили у березы повислой возрастание концентрации всех пигментов с наибольшим приростом хлорофилла *a*, который в 3 раза превышал уровень каротиноидов и хлорофилла *b* [19]. Нефтехимическое загрязнение в г. Махшахр (Иран) стимулировало синтез всех пигментов в листьях каллистемона [39], а в промышленной зоне Южного Дурбанского бассейна (Южная Африка) обнаружена прямая корреляция между концентрацией диоксида серы и содержанием хлорофилла у брахилены [29]. Следует отметить, что лишь в источниках [19, 29] описаны толерантные реакции, тогда как в остальных указаны и стрессовые компоненты, несмотря на декларируемый авторами положительный эффект загрязнения. Полученные нами данные по КМК демонстрируют сходную тенденцию: доминирование толерантных адаптивных реакций сочетается с нейтральными и стрессовыми.

Отдельную категорию составляют единичные исследования, авторы которых не обнаруживают строгих закономерностей в ответе пигментного комплекса на техногенное воздействие. Например, при оценке комбинированного влияния твердых частиц и озона в г. Варанаси не было установлено статистически значимой динамики содержания отдельных пигментов (хлорофиллов *a*, *b*, каротиноидов) и их соотношений у 13 изученных видов деревьев [35]. В нашей работе отсутствие четкой направленности адаптивных реакций зафиксировано для древостоев КБР, УПЦ и СПЦ.

Хотя авторы проанализированных работ характеризуют выявленные реакции как адаптивные, направленность этих ответов (толерантный или стрессовый) в большинстве случаев не получает качественной интерпретации. Кроме того, методологический анализ выявляет существенные пробелы: 1) преобладают исследования, сфокусированные на единичном источнике загрязнения; 2) отсутствует сравнение, при котором один вид древесных растений изучался бы по стандартизированной методике в условиях различных типов промышленного воздействия.

Проведенный анализ литературных данных демонстрирует, что реакции пигментной системы растений в условиях техногенеза характеризуются разнонаправленностью и неодинаковой степенью выраженности независимо от типа промышленного загрязнения. Полученные нами результаты подтверждают эту закономерность: все изученные виды загрязнения вызывают дестабилизацию пигментного комплекса листьев березы, проявляющуюся в несогласованности адаптивных реакций отдельных пигментов и их соотношений. Одновременная регистрация в пределах одного органа специфических и неспецифических адаптивных реакций свидетельствует о высокой чувствительности березы к техногенным воздействиям. Выявленная относительная независимость откликов различных компонентов пигментного аппарата подтверждает его пластичность в ответ на стрессовые факторы. Сравнительная оценка позволила установить, что наиболее значительное стрессовое воздействие на пигментный комплекс березы оказывает загрязнение, источники которого – СПЦ, УГОК и УПЦ.

### *Заключение*

Установлено, что промышленное загрязнение в Южно-Уральском регионе приводит к дестабилизации пигментного комплекса березы повислой, это выражается в разнонаправленности адаптивных реакций отдельных пигментов и их соотношений. Следовательно, возможность однозначной классификации общей адаптивной реакции фотосинтетического аппарата для каждого промцентра исключена. Условно можно выделить преобладающие типы реакций: толерантная – при полиметаллическом загрязнении с примесью сернистого ангидрида; стрессовая – в условиях медно-колчеданных отвалов; нейтральная – на буроугольных отвалах. Степень реализации адаптивного потенциала березы варьирует в зависимости от типа загрязнения. В одних техногенных условиях адаптивные механизмы эффективны, что обеспечивает толерантность к стрессу и поддерживает синтез пигментов на контрольном (Кумертауский буроугольный разрез, средняя реализация адаптивного потенциала) или повышенном (Карабашский медеплавильный комбинат, высокая реализация) уровнях. В других условиях адаптация ограничена, что приводит к снижению синтеза пигмен-

тов (Учалинский горно-обогатительный комбинат, низкая реализация). В случаях нефтехимического (Уфимский промышленный центр) и полиметаллического (Стерлитамакский промцентр) загрязнений выявить доминирующую адаптивную реакцию не удастся: в первом случае наблюдается равное присутствие толерантных и стрессовых реакций, во втором – относительная независимость 4 адаптивных реакций. Тем не менее, одновременная активация специфических и неспецифических реакций в этих промцентрах свидетельствует о высокой пластичности пигментного комплекса березы. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе исследованные промышленные центры образуют ряд по возрастанию: Кумертауский бурогольный разрез – Учалинский горно-обогатительный комбинат – Карабашский медеплавильный комбинат – Стерлитамакский промцентр – Уфимский промцентр. Данный ряд демонстрирует усиление степени относительной независимости адаптивных реакций пигментов и их соотношений в зависимости от типа загрязнения. Наблюдаемая тенденция служит дополнительным свидетельством пластичности пигментного комплекса.

Соотношение хлорофиллов *a* и *b* остается неизменным относительно контроля во всех промцентрах, отражая устойчивый баланс между основными хлорофиллами. Однако в условиях нефтехимического загрязнения данный показатель существенно ниже, чем в других промцентрах, что позволяет идентифицировать это загрязнение как наиболее стрессовый фактор для березы. В отличие от соотношения хлорофиллов, соотношение хлорофиллы/каротиноиды нарушается при всех типах техногенного воздействия. Наибольшие искажения данного баланса зарегистрированы при аэротехногенном полиметаллическом, нефтехимическом загрязнениях и в условиях медно-колчеданных отвалов, что подтверждает их повышенную стрессовую значимость.

Поскольку пигментный комплекс играет важную роль в адаптациях растений, комплексный анализ его состояния совместно с биохимическими, физиологическими, анатомическими и популяционными исследованиями позволит разработать научно обоснованные рекомендации по использованию березы для защитных насаждений. Это даст возможность рекомендовать березу для условий, где она проявляет толерантность и высокий адаптивный потенциал, и отказаться от ее использования в местах с преобладанием стрессовых реакций и сниженным потенциалом вида.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баландайкин М.Э. Динамика и различия в концентрации основных фотосинтетических пигментов листьев березы, произрастающей в неоднородных условиях // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 159–164.

Balandaykin M.E. Dynamics and Distinctions in Concentration of the Basic Photosynthetic Pigments of Leaves of the Birch Growing in Impure Conditions. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2014, no. 1, pp. 159–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401159>

2. Белова Т.А., Гончарова Е.Е., Протасова М.В. Оценка пигментного состава березы повислой под влиянием антропогенной нагрузки // Auditorium. Электрон. науч. журн. Курск. гос. ун-та. 2023. № 1(37). Режим доступа: [https://api-mag.kursksu.ru/api/v1/get\\_pdf/4810/](https://api-mag.kursksu.ru/api/v1/get_pdf/4810/) (дата обращения: 10.12.25).

Belova T.A., Goncharova E.E., Protasova M.V. Assessment of Pigment Composition of *Betula pendula* under the Influence of Anthropogenic Load. *Auditorium. Elektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, no. 1(37). (In Russ.).

3. Бухарина И.Л., Поварнищина Т.М., Ведерников К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: Ижевск. ГСХА, 2007. 216 с.

Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E. *Ecological and Biological Characteristics of Woody Plants in an Urban Environment*. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy Publ., 2007. 216 p. (In Russ.).

4. Васфилов С.П. Возможные пути негативного влияния кислых газов на растения // Журн. общ. биол. 2003. Т. 64, № 2. С. 146–159.

Vasfilov S.P. Possible Ways of Negative Influence of Acid Gases on Plants. *Zhurnal obshchej biologii* = Journal of General Biology, 2003, vol. 64, no. 2, pp. 146–159. (In Russ.).

5. Галимов Р.Р., Уразбахтин А.А., Уразгильдин Р.В. Сравнительная характеристика морфологических параметров листьев и побегов березы повислой при различных типах загрязнения в условиях Южно-Уральского региона // Леса России и хоз-во в них. 2024. № 4(91). С. 94–105.

Galimov R.R., Urazbakhitin A.A., Urazgildin R.V. Comparative Characteristics of Morphological Parameters of Birch Leaves and Shoots under Different Types of Pollution in the Conditions of the South Urals Region. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2024, no. 4(91), pp. 94–105. (In Russ.).

<https://doi.org/10.51318/FRET.2024.91.4.010>

6. Гамалей Ю.В. Развитие хлоренхимы листа. Л.: Наука, 1978. 192 с.

Gamalej Yu.V. *Development of Leaf Chlorenchyma*. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 192 p. (In Russ.).

7. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде: Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 208 с.

Getko N.V. *Plants in a Man-Made Environment: Structure and Function of the Assimilation Apparatus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 208 p. (In Russ.).

8. Горышина Т.К., Заботина Т.Н., Пружина Е.Г. Пластидный аппарат травянистых растений лесостепной дубравы в разных условиях освещенности // Экология. 1975. № 15. С. 15–22.

Goryshina T.K., Zabolina T.N., Pruzhina E.G. Plastid Apparatus of Herbaceous Plants of Forest-Steppe Oak Groves under Different Lighting Conditions. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 1975, no. 15, pp. 15–22. (In Russ.).

9. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2022 году. Уфа: Самрау, 2023. 319 с.

*State Report on the State of Natural Resources and the Environment of the Republic of Bashkortostan in 2022*. Ufa, Samrau Publ., 2023. 319 p. (In Russ.).

10. Донцов А.С., Суңцова Л.Н., Инишаков Е.М. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореал. зоны. 2016. № 37(5-6). С. 246–250.

Dontsov A.S., Sutsova L.N., Inshakov E.M. Assessment of the State of the Environment of the City of Krasnoyarsk Based on the State of the Photosynthetic Apparatus of Siberian Spruce. *Khvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2016, no. 37(5-6), pp. 246–250. (In Russ.).

11. Дончева-Бонева М.Н. Воздействие токсических газов на содержание пигментов в хвое сосны обыкновенной // Влияние атмосферного загрязнения и других антропогенных и природных факторов на дестабилизацию состояния лесов Центральной и Восточной Европы. Т. 1. М.: МГУЛ, 1996. С. 56–57.

Doncheva-Boneva M.N. The Effect of Toxic Gases on the Pigment Content in Scots Pine Needles. *Vliyanie atmosfernogo zagryazneniya i drugih antropogennykh i prirodnykh faktorov na destabilizatsiyu sostoyaniya lesov Tsentral'noj i Vostochnoj Evropy*, vol. 1. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 1996, pp. 56–57. (In Russ.).

12. Кавеленова Л.М., Малыхина Е.В., Розно С.А., Смирнов Ю.В. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений // Поволж. экол. журн. 2008. № 3. С. 200–210.

Kavelenova L.M., Malykhina E.V., Rozno S.A., Smirnov Yu.V. On the Methodology of Tree Leaf Ecophysiological Studies. *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal* = Povolzhskiy Journal of Ecology, 2008, no. 3, pp. 200–210. (In Russ.).

13. Майдебура И.С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомоморфологические особенности и биохимические показатели древесных растений: дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2006. 146 с.

Majdebura I.S. *The Impact of Air Pollution in the City of Kaliningrad on the Anatomical and Morphological Characteristics and Biochemical Parameters of Woody Plants*: Cand. Biol. Sci. Diss. Kaliningrad, 2006. 146 p. (In Russ.).

14. Маракаев О.А., Смирнова Н.С., Загоскина Н.В. Техногенный стресс и его влияние на листовые древесные растения (на примере парков г. Ярославля) // Экология. 2006. № 6. С. 410–414.

Marakaev O.A., Smirnova N.S., Zagoskina N.V. Technogenic Stress and Its Effect on Deciduous Trees (an Example from Parks in Yaroslavl). *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2006, no. 6, pp. 373–377. <https://doi.org/10.1134/S1067413606060026>

15. Методы биохимического анализа растений / под ред. В.В. Полевого, Г.Б. Максимовой. Л.: ЛГУ, 1978. 192 с.

*Methods of Biochemical Analysis of Plants*. Ed. by V.V. Polevoj, G.B. Maksimova. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1978. 192 p. (In Russ.).

16. Мокронос А.Т. Фотосинтетическая функция и целостность растительного организма // 42-е Тимирязевские чтения. М.: Наука, 1983. 64 с.

Mokronosov A.T. *Photosynthetic Function and Integrity of the Plant Organism*. 42-e Timiryazevskie chteniya. Moskva, Nauka Publ., 1983. 64 p. (In Russ.).

17. Реферат по итогам оказания услуг по осуществлению регулярных наблюдений химического загрязнения атмосферного воздуха на территории города Карабаша, где нет государственной наблюдательной сети. Челябинск: Филиал ЦЛАТИ по УФО, 2021. 7 с.

*Abstract on the Results of the Provision of Services for the Implementation of Regular Observations of Chemical Air Pollution in the Territory of the City of Karabash, Where There is No State Monitoring Network*. Chelyabinsk, Branch of the Centre for Laboratory Analysis and Technical Measurements in the Ural Federal District Publ., 2021. 7 p. (In Russ.).

18. Соколова Г.Г. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19, № 1. С. 223–228.

Sokolova G.G. Impact of Technogenic Pollution on the Pigment Composition of Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) in the Urban Conditions of Barnaul. *Problemy botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii* = Problems of Botany of South Siberia and Mongolia, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 223–228. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020044>

19. Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П. Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 35–47.

Stasova V.V., Skripal'shchikova L.N., Astrakhanitseva N.V., Barchenkov A.P. Photosynthetic Pigments in Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) with Technogenic Load. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 35–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-35-47>

20. Тахтаджян А.А. Высшие растения. Т. 1. М.; Л.: АН СССР, 1956. 488 с.

Takhtadzhyan A.A. *Higher Plants*: Vol. 1. Moscow, Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1956. 488 p. (In Russ.).

21. Тужилкина В.В. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение // Экология. 2009. № 4. С. 243–248.

Tuzhilkina V.V. Reaction of the Pigment System of Conifers to Long-Term Aero-technogenic Pollution. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2009, no. 4, pp. 243–248. (In Russ.).

22. Уразгильдин Р.В. Лесообразующие виды Предуралья в условиях техногенеза: сравнительная эколого-биологическая характеристика, видоспецифичность, адаптивные реакции, адаптивные стратегии: дис. ... д-ра биол. наук. Уфа, 2021. 367 с.

Urazgildin R.V. *Forest-Forming Species of the Cis-Urals under Technogenic Conditions: Comparative Ecological and Biological Characteristics, Species Specificity, Adaptive Responses, Adaptive Strategies*: Doc. Biol. Sci. Diss. Ufa, 2021, 367 p. (In Russ.).

23. Уразгильдин Р.В., Аминова К.З., Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю., Яшин Д.А. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях промышленного загрязнения // Карельск. науч. журн. 2016. Т. 5, № 1(14). С. 90–94.

Urazgildin R.V., Amineva K.Z., Zaitsev G.A., Kulagin A.U., Yashin D.A. Comparative Characteristic of Oak (*Quercus robur* L.), Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Birch (*Betula pendula* Roth.) Pigmentary Complex Formation in Industrial Pollution Conditions. *Karel'skij nauchnyj zhurnal*, 2016, vol. 5, no. 1(14), pp. 90–94. (In Russ.).

24. Флора СССР. Т. 1 / под ред. М.М. Ильина. Л.: АН СССР, 1934. 302 с.

*Flora of the USSR*: Vol. 1. Ed. by M.M. Il'in. Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1934. 302 p. (In Russ.).

25. Цандекова О.Л. Динамика накопления пигментов в листьях *Betula pendula* Roth. в условиях породного отвала угледобывающей промышленности // Вестн. Алтайск. гос. аграрн. ун-та. 2016. № 6(140). С. 60–64.

Tsandeskova O.L. The Dynamics of Pigment Accumulation in Leaves of *Betula pendula* Roth. in a Mining Rock Dump. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agrarian University, 2016, no. 6(140), pp. 60–64. (In Russ.).

26. Цандекова О.Л., Неворова О.А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // Изв. СамНЦ РАН. 2010. Т. 12, № 1(3). С. 853–856.

Tsandeskova O.L., Neverova O.A. Influence of Motor Transport Emissions on the Wood Plants Leaves Pigmentary Complex. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 1(3), pp. 853–856. (In Russ.).

27. Чупахина Г.Н. Физиологические и биохимические методы анализа растений: Практикум. Калининград: Калининградск. ун-т, 2000. 59 с.

Chupakhina G.N. *Physiological and Biochemical Methods of Plant Analysis*: Tutorial. Kaliningrad: Kaliningrad University Publ., 2000. 59 p. (In Russ.).

28. Шлык А.А., Прудникова И.В., Парамонова Т.К. Биосинтез и состояние хлорофиллов в растении. Минск: Наука и техника, 1975. С. 42–57.

Shlyk A.A., Prudnikova I.V., Paramonova T.K. *Biosynthesis and State of Chlorophylls in Plants*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975, pp. 42–57. (In Russ.).

29. Areington C.A., Varghese B., Serhsen H. The Utility of Biochemical, Physiological and Morphological Biomarkers of Leaf Sulfate Levels in Establishing *Brachylaena discolor* leaves as a Bioindicator of SO<sub>2</sub> Pollution. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, vol. 118, pp. 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.06.025>

30. Goodwin T.W. *The Biochemistry of the Carotenoids. Vol. 1: Plants*. London, New York, Chapman and Hall Publ., 1980. 378 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5860-9>

31. Gowin T., Góral I. Chlorophyll and Pheophytin Content in Needles of Different Age of Trees Growing under Conditions of Chronic Industrial Pollution. *Acta Societatis Botanicae Poloniae*, 1977, vol. 46, no. 1, pp. 151–159. <https://doi.org/10.5586/asbp.1977.012>

32. Mathis P., Kleo J. The Triplet State of  $\beta$ -Carotene and of Analog Polyenes of Different Length. *Photochemistry and Photobiology*, 1973, vol. 18, iss. 4, pp. 343–346. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1973.tb06431.x>

33. Mikhailova T.A., Afanasieva L.V., Kalugina O.V., Shergina O.V., Taranenko E.N. Changes in Nutrition and Pigment Complex in Pine (*Pinus sylvestris* L.) Needles under Technogenic Pollution in Irkutsk Region, Russia. *Journal of Forest Research*, 2017, vol. 22, iss. 6, pp. 386–392. <https://doi.org/10.1080/13416979.2017.1386020>

34. More R.S., Chaubal S.S. Determination of Stress and Comparison by Estimation of Chlorophyll – a, b and Carotenoid Contents among Plants Growing along Mithi River, Mumbai. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2017, vol. 8, iss. 1, pp. 1–8.

35. Mukherjee A., Agrawal M. Use of GLM Approach to Assess the Responses of Tropical Trees to Urban Air Pollution in Relation to Leaf Functional Traits and Tree Characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 152, pp. 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.038>

36. Prajapati S.K., Tripathi B.D. Seasonal Variation of Leaf Dust Accumulation and Pigment Content in Plant Species Exposed to Urban Particulates Pollution. *Journal of Environmental Quality*, 2008, vol. 37, iss. 3, pp. 865–870. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0511>

37. Prusty B.A.K., Mishra P.C., Azeez P.A. Dust Accumulation and Leaf Pigment Content in Vegetation near the National Highway at Sambalpur, Orissa, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, vol. 60, iss. 2, pp. 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.013>

38. Rostunov A., Konchina T., Zhestkova E., Gusev D., Kharitonov S. The Dependence of Morphological and Physiological Indicators of the Leaves of Woody Plants on the Degree of Technogenic Pollution. *Technology. Resources: Proceedings of the 11th Internet Scientific and Practical Conference: Vol. 1. Latvia, Rezekne Academy of Technologies*, 2017, pp. 235–239. <https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2516>

39. Seyyednejad S.M., Niknejad M., Yusefi M. Study of Air Pollution Effects on Some Physiology and Morphology Factors of *Albizia lebbeck* in High Temperature Condition in Khuzestan. *Journal of Plant Sciences*, 2009, vol. 4, iss. 4, pp. 122–126. <https://doi.org/10.3923/jps.2009.122.126>

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

---

**Вклад авторов:** Галимов Рамиль Раилович: сбор полевого материала, камеральная обработка, статистическая обработка, написание статьи; Уразгильдин Руслан Вилисович: постановка эксперимента, сбор полевого материала, редактирование статьи

**Authors' Contribution:** Galimov Ramil Railovich: field data collection, office processing, statistical processing, article writing; Urazgildin Ruslan Vilisovich: experiment setting, field data collection, article editing

Научная статья

УДК 634.0.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-121-133

## Особенности годичного прироста побегов *Pinus sylvestris* L. в условиях урбанизированной среды

**Е.В. Желтикова**<sup>✉</sup>, аспирант; ResearcherID: [MFI-7640-2025](https://orcid.org/0009-0009-7743-4038),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7743-4038>

**А.И. Григорьев**, д-р биол. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2373-7123>

Омский государственный педагогический университет, набережная им. Тухачевского, д. 14, г. Омск, Россия, 644099; 89618841366@yandex.ru<sup>✉</sup>, aigrigoryew@mail.ru

---

Поступила в редакцию 18.12.24 / Одобрена после рецензирования 01.03.25 / Принята к печати 03.03.25

---

**Аннотация.** Цель работы – изучение особенностей годичного прироста побегов деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от гидротермического режима воздушной среды в условиях г. Омска. Предметом исследования является анализ роста побегов в течение вегетационного периода. Рассмотрен характер гидротермического режима посредством построения климатодиаграмм по Госсену–Вальтеру для мая на основе данных агрометеорологических бюллетеней Омского гидрометцентра с 1960 г. по настоящее время. Изучены особенности динамики годичного прироста побегов у деревьев сосны обыкновенной на 3 различных участках в г. Омске. Представлена характеристика рассматриваемых участков культур сосны, описаны закономерности годичного прироста побегов модельных деревьев. Выполнен анализ синхронности годичных приростов модельных деревьев по С.Г. Шиятову. В результате корреляционного анализа по методу скользящей средней была выявлена умеренная связь между годичным приростом и температурой воздушной среды за май–июнь на всех участках, умеренная связь с суммой осадков за май и май–июнь получена только для одного участка. Согласно климатодиаграммам, за последние 3 десятилетия в мае увеличилась частота влажных периодов, в то же время их продолжительность уменьшилась. Кроме того, установлены очень низкие коэффициенты корреляции годичного прироста сосны с температурами и осадками за исследуемые месяцы вегетационного периода, что подтверждает отсутствие прямолинейных связей между ними. Материалы исследования могут быть полезны при организации работ по уходу за насаждениями сосны обыкновенной и разработке теоретических основ производства культур сосны в городских условиях.

**Ключевые слова:** годичный прирост побегов, сосна обыкновенная, гидротермический режим, климатодиаграмма, коэффициент синхронности по С.Г. Шиятову, метод скользящей средней, коэффициент корреляции, Омск

**Для цитирования:** Желтикова Е.В., Григорьев А.И. Особенности годичного прироста побегов *Pinus sylvestris* L. в условиях урбанизированной среды // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 121–133. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-121-133>

---

Original article

## Features of Annual *Pinus sylvsetris* L. Shoot Increment in an Urbanized Environment

*Ekaterina V. Zheltikova*<sup>✉</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [MFI-7640-2025](https://orcid.org/0009-0009-7743-4038),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7743-4038>

*Arkadij I. Grigor'ev*, Doctor of Biology, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2373-7123>  
Omsk State Pedagogical University, Naberezhnaya im. Tukhachevskogo, 14, Omsk, 644099,  
Russian Federation; 89618841366@yandex.ru<sup>✉</sup>, aigrigoryew@mail.ru

---

Received on December 18, 2024 / Approved after reviewing on March 1, 2025 / Accepted on March 3, 2025

---

**Abstract.** The aim of the research has been to study the features of the annual increment of shoots of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees depending on the hydrothermal regime of the air environment in the conditions of the city of Omsk. The subject of the study has been the analysis of shoot growth during the growing season. The nature of the hydrothermal regime is considered by constructing climatic diagrams according to Gossen–Walter based on data from the agrometeorological bulletins of the Omsk hydrometeorological centre from 1960 to the present day for May. The features of the dynamics of annual shoot increment in Scots pine trees have been studied at 3 different sites in the city of Omsk. The characteristics of the considered areas of pine crops have been presented, and the patterns of annual increment of shoots of model trees have been described. An analysis of the synchronicity of annual increment of model trees according to S.G. Shiyatov has been carried out. As a result of the correlation analysis using the moving average method, a moderate relationship has been found between the annual increment and the air temperature for May–June in all areas; a moderate relationship with the amount of precipitation for May and May–June has been obtained only for one area. According to climatic diagrams, over the past 30 years, the frequency of wet periods in May has increased, while their duration has decreased. In addition, very low correlation coefficients have been established between the annual increment of pine trees and temperatures and precipitation over the studied months of the growing season, which confirms the absence of linear relationship between them. The research materials can be useful in organizing work on the care of Scots pine plantations and developing theoretical foundations for the production of pine crops in urban conditions.

**Keywords:** annual shoot increment, Scots pine, hydrothermal regime, climatic diagram, synchronicity coefficient according to S.G. Shiyatov, moving average method, correlation coefficient, Omsk

**For citation:** Zheltikova E.V., Grigor'ev A.I. Features of Annual *Pinus sylvsetris* L. Shoot Increment in an Urbanized Environment. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 121–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-121-133>

### Введение

К настоящему времени накоплен достаточный объем информации о продолжительности и интенсивности роста хвойных деревьев в регионах России [2, 4, 5, 16, 18, 22]. Выявлены [9, 12–15, 19–22] различия по уровням межгодовой изменчивости тепло- и влагообеспеченности местообитаний хвойных видов, групп популяций и отдельных популяций, что необходимо учитывать при прогнозировании реакции видов на изменения климата.

В ходе исследования [9] установили, что в условиях Европейского Севера с продвижением к северу увеличивается влияние на годичный прирост сосновых культур в высоту температуры вегетационного периода предыдущего года. Так, в северной подзоне тайги Архангельской области на годичный прирост сосны в высоту превалирующее воздействие по сравнению с остальными факторами оказывают осадки за май–июль и средняя температура воздуха за июнь–июль предыдущего года. При этом теснота связи – от значительной до высокой.

Обширные исследования воздействия гидротермического режима воздушной среды на рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) были проведены А.П. Тольским в условиях Бузулукского бора [10]. Выявлена связь до сильной ( $r = 0,70; 0,09$ ) прироста сосны с суточными минимумами температур в мае. Годичный побег сосны П.Б. Раскатов рассматривал как индикатор неблагоприятных условий, в т. ч. засух [8].

Для территории юга Западной Сибири данные исследования проведены в незначительном количестве, однако они представляют большой интерес при изучении интродуцированных видов древесных растений.

Анализ динамики развития побегов ивы трехтычинковой при разном атмосферном увлажнении позволил установить, что 2-й и 3-й многодневные циклы характеризуются наибольшим суточным приростом побегов в 1-й половине лета [1]. При этом рекомендуется при изучении роста и развития побегов у клонов ивы трехтычинковой учитывать неравномерность распределения осадков в 1-й половине вегетационного периода. Наряду с этим по результатам мониторинга радиального роста сосны обыкновенной наблюдали [6] повышенную чувствительность вида к температуре и осадкам в середине июня. Согласно [7], чем выше минимальные температуры воздуха в мае, тем больше прирост побегов сосны.

Целью данного исследования является выявление закономерностей годичного прироста побегов сосны обыкновенной в зависимости от режима осадков и температуры воздушной среды в условиях г. Омска.

#### *Объекты и методы исследования*

Для изучения динамики годичного роста побегов модельных деревьев и выявления закономерностей их развития в условиях городской среды были выбраны 3 участка, основные характеристики которых следующие:

Участок 1 – территория дендропарка Омского государственного аграрного университета, расположена у основания склона 2-й надпойменной террасы на правом берегу р. Иртыша. Здесь произрастает 2 модельных дерева, посаженных в 1994 г., густота посадки – одиночные, технология посадки – ручным способом под мечом Колесова. Деревья характеризуются I, II классом (по Крафту), их возраст – 39 лет, средняя высота – 11,6 м, диаметр на высоте 1,3 м – от 14,11 до 14,84 см, положение в пологе – ступенчатое (по Г.Р. Эйтингену), средний диаметр крон – 4 м, здоровые по санитарному состоянию (без повреждений). Деревья расположены на опушечной части с западной стороны в затененном месте среди других высоких деревьев.

Участок 2 расположен около гостиницы «Иртыш», на 1-й надпойменной террасе р. Иртыша, на правом берегу. Выбрано 10 модельных деревьев сосны

обыкновенной, которые были посажены в 1971 г. ручным способом под меч Колесова 2-летними саженцами по схеме 2×2 м, густота посадки – 2500 шт./га. Класс роста и развития обследованных деревьев – I, II, возраст – до 62 лет, средняя высота 16,4 м, диаметр на высоте 1,3 м – от 11,53 до 25,10 см, средний диаметр крон – 5 м, положение в пологе – ступенчатое, санитарное состояние – здоровые. Деревья расположены куртинно на площади 100×200 м, без затенения в течение всего солнечного периода.

Участок 3 находится в районе ул. 22 Декабря на расстоянии около 300 м от аэропорта им. Д.М. Карбышева, на уступе 3-й надпойменной террасы. Выбрано 10 модельных деревьев. Год посадки – 1984 г., размещение – 2-рядное (между рядами – 3 м, в ряду – 2 м), густота посадки – 1667 шт./га, технология посадки – ручным способом под меч Колесова 2-летними саженцами. Деревья имеют I, II классы роста по Крафту, возраст – до 50 лет, среднюю высоту – 12,9 м, диаметр на высоте 1,3 м – от 16,24 до 27,52 см, средний диаметр крон – от 5 до 7 м, положение в пологе – ступенчатое, санитарное состояние – здоровые. Деревья расположены единично с севера на юг в 2 ряда вдоль автодороги, без затенения на протяжении всего солнечного периода. У изученных деревьев наблюдается очищение от сучьев на высоту ствола от 1,5 до 2 м. Ветви для замеров находились на высоте 1,8–2,2 м и сформировались в пределах 7–9 лет после посадки саженцев.

Для анализа гидротермического режима воздушной среды в период роста побегов сосны в отдельные годы с 1960 по 2024 гг. на основе данных агрометеорологических бюллетеней Омского гидрометцентра построены климадиаграммы по Госсену–Вальтеру с учетом дополнений Г.Б. Гортинского [2, 3].

Сроки начала и окончания периода роста побегов у деревьев являются важными показателями годичного прироста, т. е. реакции особи на гидротермические условия, поскольку напрямую связаны с переходом температуры воздуха и почвы через пороговые количества тепла, получаемого растением за период, предшествующий наступлению фенофазы [2].

В качестве срока начала вегетации – видимого роста побегов – была принята середина апреля, т. к. именно в этот период произошел переход среднесуточной температуры через +5 °С в сторону повышения; за окончание приняты середина июня, когда завершается прирост побегов у сосны. Таким образом, климадиаграммы были построены для апреля, мая и июня, а также для суммарных значений апрель+май, апрель+май+июнь и май+июнь 1960–2024 гг. Используются гидротермические данные по рассматриваемому месяцу за соответствующий год. На рис. 1 представлена климадиаграмма за май как месяц, характеризующийся наибольшим приростом сосны [2]. Изучение климадиаграмм показало высокую степень соответствия гидротермического режима воздушной среды г. Омска потребностям древесных растений. Это означает, что территория города является перспективной для интродукции хвойных видов.

Климадиаграмма мая за рассматриваемые 63 года включает в себя как отдельные засушливые промежутки в 1–4 года с преобладанием жаркой сухой погоды, так и периоды избыточного увлажнения при положительных температурах. Засушливыми и наиболее жаркими оказались 1961–1965, 1967, 1972, 1978, 1980–1981, 1991–1993, 1997–1999, 2001, 2003–2006, 2016, 2020–2023 гг. – всего около 39,68 % рассматриваемого временного отрезка. Средние температуры мая за изучаемые годы находятся в пределах от +7 до +15 °С.

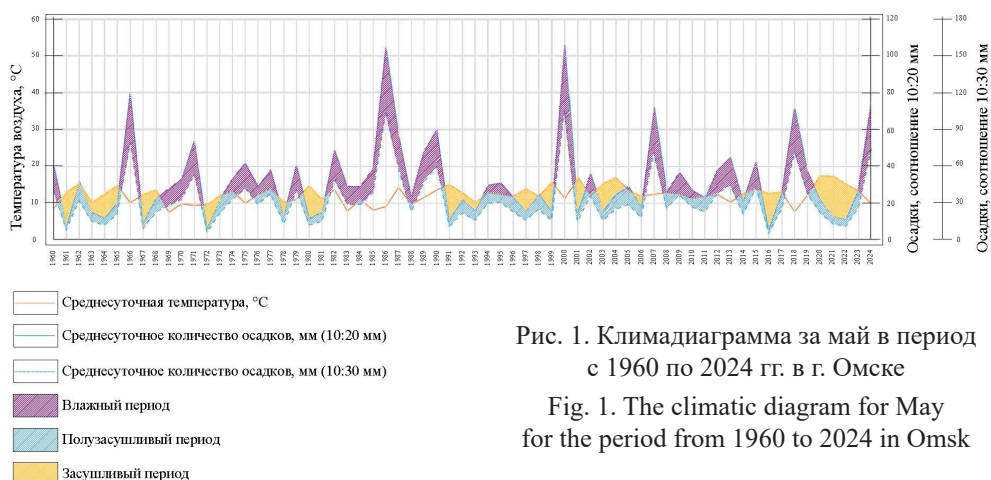


Рис. 1. Климадиаграмма за май в период с 1960 по 2024 гг. в г. Омске

Fig. 1. The climatic diagram for May for the period from 1960 to 2024 in Omsk

На всех участках у модельных деревьев сосны установление годично-го прироста производилось в нижней части кроны на боковых побегах. Побеги были замерены с использованием металлической линейки с точностью до 0,1 см. Далее с помощью метода сравнений рассчитывали коэффициенты синхронности по С.Г. Шиятову для оценки сходства годовичных приростов сосны обыкновенной на выбранных участках и выявления отличий зависимости прироста от осадков и температур в разных условиях произрастания деревьев [11].

Для анализа динамики годичного прироста побегов сосны обыкновенной вычислены индексы с периодом осреднения 5 лет. Для выявления связей годичного прироста побегов сосны с гидротермическим режимом воздушной среды использованы статистические методы и корреляционный анализ. При вычислении корреляционного отношения для оценки связи между признаками применена шкала Чеддока.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для расчетов коэффициента синхронности построены графики годовичных приростов побегов исследуемых деревьев (рис. 2).

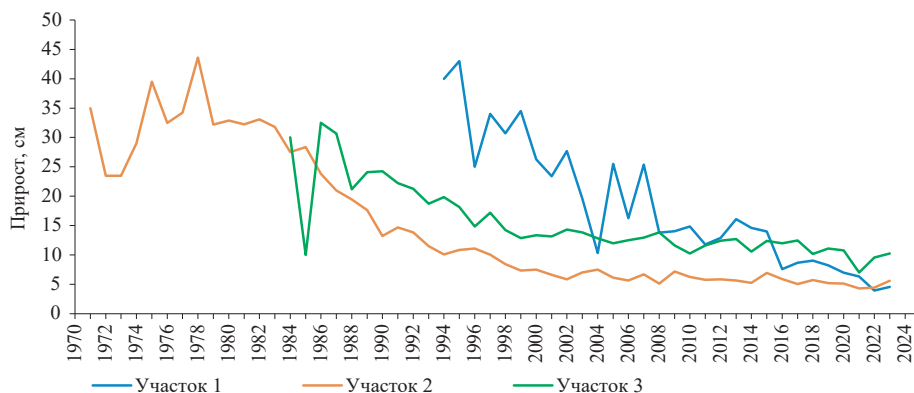


Рис. 2. Динамика годичного прироста модельных деревьев сосны на различных участках в условиях г. Омска

Fig. 2. The dynamics of annual increment of model pine trees in various sites in the city of Omsk

Для участков 1–3 получены следующие коэффициенты синхронности приростов (%):

Участки 1 и 2.....	26,32
Участки 1 и 3.....	32,14
Участки 2 и 3.....	32,14

Уровень синхронности годовых приростов модельных деревьев на площадках составляет менее 45 %, т. е. синхронность в динамике годового прироста побегов отсутствует. Это связано с различным геоморфологическим положением участков исследования и, соответственно, с особенностями в гидрологическом режиме почвенно-грунтовых условий.

В табл. 1 представлен расчет коэффициента синхронности годового прироста побегов с количеством осадков и температурами.

Таблица 1

**Коэффициенты синхронности годового прироста побегов модельных деревьев с количеством осадков и температурами**  
**The synchronicity coefficients of the annual shoot increment of model trees with precipitation and temperatures**

Месяц	Участок	Параметр сравнения	Коэффициент синхронности
Апрель	1	Осадки	14,29
		Температура	<b>57,14</b>
	2	Осадки	25,49
		Температура	37,25
	3	Осадки	28,95
		Температура	28,95
Май	1	Осадки	<b>67,86</b>
		Температура	25,00
	2	Осадки	23,53
		Температура	29,41
	3	Осадки	52,63
		Температура	47,37
Апрель+май	1	Осадки	46,43
		Температура	<b>57,14</b>
	2	Осадки	39,12
		Температура	35,29
	3	Осадки	42,11
		Температура	31,58
Июнь	1	Осадки	50,00
		Температура	28,57
	2	Осадки	9,80
		Температура	31,37
	3	Осадки	52,63
		Температура	23,68
Апрель+май+июнь	1	Осадки	42,86
		Температура	28,57
	2	Осадки	29,41
		Температура	13,73

Окончание табл. 1

Месяц	Участок	Параметр сравнения	Коэффициент синхронности
Апрель+май+ +июнь	3	Осадки	52,63
		Температура	23,68
Май+июнь	1	Осадки	32,14
		Температура	14,29
	2	Осадки	39,22
		Температура	35,19
	3	Осадки	50,00
		Температура	26,32

Примечание: Полужирным шрифтом выделены коэффициенты, показывающие низкий уровень синхронности.

Выявлено отсутствие синхронности годовичного прироста побегов модельных деревьев с одной стороны и осадков и температур с другой в апреле – в этот период только начинается фенофаза, влияния на которую приоритетно оказывают температуры [2, 13, 16–18]. Исключением стал участок 1, для которого показана низкая синхронность в отношении температуры, что объясняется произрастанием модельных деревьев в условиях окружения другими высокоствольными деревьями лиственных и хвойных пород, что создает свой, более стабильный, микроклимат, менее реагирующий на кратковременное изменение температуры окружающей среды.

Для мая также зафиксировано отсутствие синхронности годовичного прироста с осадками и температурами. Исключением вновь является участок 1 с низкой синхронностью в отношении осадков, поскольку в мае фенофаза в регионе уже начинается, влияние осадков становится приоритетным, что можно объяснить произрастанием модельных деревьев в условиях окружения другими высокоствольными деревьями.

Деревья на участке 1 за период апрель+май показали низкую синхронность в отношении температуры. Остальные участки также характеризуются отсутствием синхронности как отклика не только на температуру, но и на осадки.

В июне, а также в периоды апрель+май+июнь и май+июнь на всех участках отсутствует синхронность годовичного прироста побегов модельных деревьев с уровнем осадков и температурами.

Также необходимо отметить, что на участке 2 складываются относительно более благоприятные гидротермические условия для роста и развития сосны: на 1-й надпойменной террасе формируется благоприятный баланс влаги в почве за счет поверхностного стока и подпора уровня зеркала грунтовых вод.

Поскольку закономерности в развитии модельных деревьев на различных площадках при помощи коэффициентов синхронности не выявлены, далее использован способ скользящей средней как основной и наиболее простой способ технического анализа, позволяющий нивелировать различия возраста исследуемых деревьев и неучтенных факторов (рис. 3).

По данным рис. 3 можно отметить среднюю периодичность минимальных и максимальных индексов годовичного прироста по каждому участку (табл. 2).

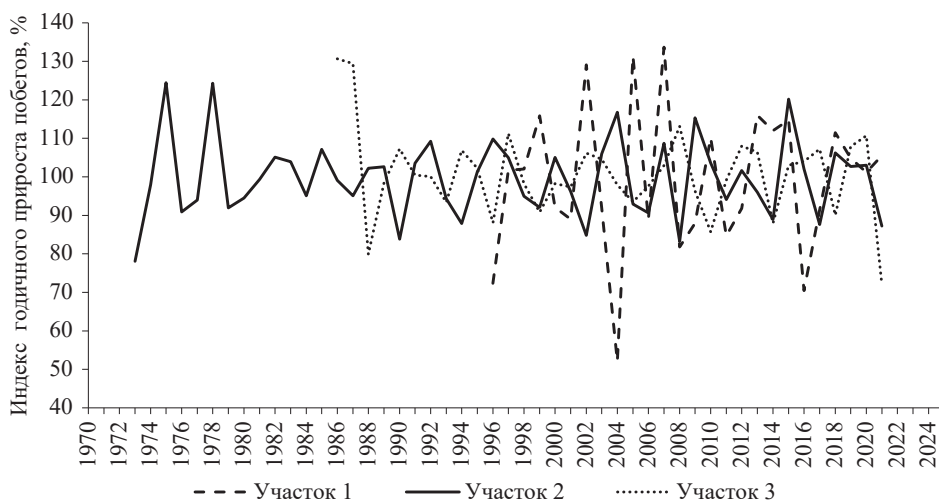


Рис. 3. Динамика индексов годичного прироста побегов деревьев сосны на территории г. Омска

Fig. 3. The dynamics of annual increment of Scots pine shoots in the city of Omsk

Таблица 2

**Динамика периодичности индексов минимального  
и максимального годичных приростов побегов  
The dynamics of the periodicity of indices of the minimum  
and maximum annual shoot growth**

Участок	Год(ы)	Максимум прироста, см	Год(ы)	Минимум прироста, см
1	1999	2	1996	8
	2001		2004	
	2001	3	2004	12
	2004		2016	
	2004, 2006, 2008, 2009, 2011	2	—	
	2013	5	—	—
2018	—		—	
<i>Среднее</i>	2,7		10,0	
2	1975	3	1976	3
	1978		1979	
	1978	26	1979	11
	2004		1990	
	2004	5	1990	12
	2009		2002	
	2009	6	2002	6
2015	2008			
<i>Среднее</i>	6,7		6,8	
3	1990	7	1988	8
	1997		1996	
	1997	11	1996	14
	2008		2010	

Окончание табл. 2

Участок	Год(ы)	Максимум прироста, см	Год(ы)	Минимум прироста, см
3	2008	4	2010	4
	2012		2014	
	2012	5	2014	4
	2017		2018	
	2017	3	2018	3
	2020		2021	
<i>Среднее</i>	6,0		6,6	

Более длинные циклы по годовичному приросту побегов модельных деревьев составляют по минимальным значениям 10 лет (участок 1) и по максимальным – 6,7 лет (участок 2). Наиболее критическими годами для всех участков по максимумам прироста являются – 1999, 2002, 2004, 2005, 2007, 2009 и 2015 гг., по минимумам – 1988, 1996, 2002, 2004, 2008, 2016 и 2021 гг.

На графике рис. 2 хорошо прослеживается существенная амплитуда колебаний годовичного прироста побегов модельных деревьев. Периоды максимума характеризуются наличием теплых влажных периодов как непосредственно в момент достижения максимума, так и в предшествовавшие ему годы. Минимумы связаны с годами с наименьшими атмосферными осадками в мае или низкими температурами в апреле.

Особенности гидротермического режима периодов максимумов и минимумов для каждого участка следующие. Участок 1 отличается наибольшим периодом минимумов и наименьшим периодом максимумов среди рассматриваемых участков, но частота максимумов наибольшая. Такая реакция растений, вероятно, вызвана их произрастанием среди деревьев, которые образуют свой уникальный биогеоценоз. Участки 2 и 3 не отличаются частотой периодов минимумов и максимумов, а средняя повторяемость периодов сходная.

Для более глубокого анализа годовичного прироста побегов исследуемых модельных деревьев в зависимости от сложившегося гидротермического режима в исследуемые периоды были вычислены коэффициент корреляции и корреляционное отношение (табл. 3).

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции и корреляционное отношение годовичного прироста побегов сосны обыкновенной в зависимости от гидротермического режима воздушной среды в условиях г. Омска**  
**The correlation coefficients and correlation ratio of the annual growth of Scots pine shoots depending on the hydrothermal regime of the air environment in the conditions of Omsk**

Участок	Месяц	Температура		Осадки	
		коэффициент корреляции	корреляционное отношение	коэффициент корреляции	корреляционное отношение
1	Апрель	-0,06	0,06	-0,28	0,29
	Май	-0,09	0,09	0,12	0,12
	Апрель+май	-0,10	0,10	-0,02	0,02

Окончание табл. 3

Участок	Месяц	Температура		Осадки	
		коэффициент корреляции	корреляционное отношение	коэффициент корреляции	корреляционное отношение
1	Июнь	-0,33*	0,34*	0,10	0,10
	Апрель+июнь	-0,33*	0,35*	0,03	0,03
	Май+июнь	-0,32*	0,34*	0,15	0,15
	Июль со сдвигом на 1 год	-0,08	0,08	0,14	0,14
2	Апрель	-0,14	0,14	-0,22	0,22
	Май	-0,38*	0,42**	0,07	0,07
	Апрель+май	-0,31*	0,33*	-0,04	0,04
	Июнь	-0,14	0,14	0,01	0,01
	Апрель+июнь	-0,25	0,26	-0,03	0,03
	Май+июнь	-0,30*	0,32*	0,06	0,06
	Июль со сдвигом на 1 год	-0,16	0,16	-0,04	0,04
3	Апрель	-0,22	0,22	-0,14	0,15
	Май	-0,20	0,20	0,32*	0,34*
	Апрель-май	-0,28	0,29	0,24	0,25
	Июнь	-0,33*	0,35*	0,11	0,11
	Апрель+июнь	-0,39*	0,42**	0,25	0,26
	Май+июнь	-0,36*	0,38*	0,31*	0,33*
	Июль со сдвигом на 1 год	0,05	0,05	-0,01	0

Примечание: Коэффициенты значимы на уровне: \* -  $t_{\text{факт}} > t_{05}$ ; \*\* -  $t_{\text{факт}} > t_{01}$ .

Согласно данным табл. 3, наблюдается несогласованность прироста выбранных модельных деревьев на участках с количеством осадков и температурами. Такая особенность изученных деревьев определяется геоморфологическими характеристиками местности, обусловленными антропогенным влиянием в условиях городской среды, в итоге проявилось косвенное воздействие на прирост температур и осадков и понижена реакция деревьев в этих условиях.

На участке 1 выявлена низкая синхронность в апреле и апреле+мае с температурами (57,14 и 52,63 % соответственно), при этом в мае наблюдается низкая синхронность с осадками (67,86 %), что подтверждено данными табл. 3. Так, годичный прирост находится в умеренной зависимости (от 0,34 до 0,35) с температурой воздушной среды для периодов апрель+июнь и май+июнь, а также июня, но вместе с тем в эти же периоды наблюдается в средней степени отрицательная зависимость прироста от температуры (0,33, 0,33 и 0,32).

Деревья на участке 3 реагируют на внешние факторы сходно с участком 1, т. е. выявлена умеренная связь с температурой для июня, апреля+июня и мая+июня. Также обнаружена умеренная связь с суммой осадков за май (0,34) и май+июнь (0,33); при этом коэффициенты корреляции (0,32 и 0,31) показали положительный средний уровень связи, достоверность при 5%-м уровне значимости критерия Стьюдента.

На участке 2 связь прироста с осадками не выявлена. Наблюдается умеренная связь с температурой (от 0,32 до 0,42) для мая, апреля+мая и мая+июня, достоверно при 5%-м и 1%-м уровнях значимости, но вместе с тем в эти же периоды отмечена в средней степени отрицательная зависимость прироста от температурного фактора в мае, апреле+мае и мае+июне (0,38, 0,31 и 0,30 соответственно), достоверность при 5%-м уровне значимости.

На всех участках обнаружено очень слабое влияние гидротермического режима воздушной среды в период формирования почки (июль предыдущего года) на сезонный прирост побегов (осадки – от –0,01 до 0,14 и от 0 до 0,14; температура – от –0,08 до 0,05 и от 0,05 до 0,16), значения недостоверны.

### Заключение

Изученные культуры сосны обыкновенной на территории г. Омска испытывают воздействие различных сочетаний экологических факторов, что подтверждается низким уровнем синхронности в динамике годичного прироста побегов по участкам.

Анализ климатодиаграмм позволил установить периодичность засушливых и влажных лет, наступления минимальных температур в мае. Особенностью климатодиаграммы за май является то, что средняя продолжительность влажных периодов с 1960 г. составила 11,6 лет, засушливых – 5,5 лет, минимальных температур – 10,3 года. Также необходимо отметить, что частота влажных периодов за последние 3 десятилетия увеличивается, а продолжительность периода сокращается.

Очень низкие коэффициенты корреляции годичного прироста сосны с температурами и количеством осадков за весенне-летние месяцы (апрель–июнь) вегетационного периода являются подтверждением отсутствия прямолинейных связей между этими показателями.

Выявлена умеренная связь для мая–июня и всех участков между годичным приростом и температурой воздушной среды и только на одном участке для мая и мая–июня – с суммой осадков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Афонин А.А. Динамика развития побегов ивы трехтычинковой при разном атмосферном увлажнении // Лесоведение. 2023. № 1. С. 44–51.

Afonin A.A. Development Dynamics of the Almond Willow's Shoots on Different Levels Atmospheric Moisture. *Lesovedenie*, 2023, no. 1, pp. 44–51. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S0024114823010023>

2. Бабарыкина И.В. Сезонный рост хвойных растений в условиях Дендропарка ОмГАУ (г. Омск) // Естественные науки и экология. Ежегодник. Вып. 10: межвуз. сб. науч. тр. Омск: ОмГПУ, 2006. С. 46–49.

Babarykina I.V. Seasonal Growth of Coniferous Plants in the Conditions of the Omsk State Agrarian University Arboretum (Omsk). *Natural Sciences and Ecology: Yearbook*. Iss. 10: Interuniversity Collection of Scientific Papers. Omsk, Omsk State Pedagogical University Publ., 2006, pp. 46–49. (In Russ.).

3. Гортинский Г.Б. Модификация климатодиаграмм по Госсену-Вальтеру для решения оперативных экологических задач // Экология и защита леса. Лесные экосистемы и их защита. Л.: ЛТА, 1984. С. 142–146.

Gortinskij G.B. Modification of Gossen-Walter Climatic Diagrams for Solving Operational Environmental Problems. *Ekologiya i zashchita lesa. Lesnye ekosistemy i ikh zashchita*. Leningrad, Forest Technology Academy Publ., 1984, pp. 142–146. (In Russ.).

4. Григорьев А.И. Закономерности адаптации древесных растений в лесостепи Западной Сибири: дис. ... д-ра биол. наук. Омск, 2000. 392 с.

Grigor'ev A.I. *Patterns of Adaptation of Woody Plants in the Forest-Steppe of Western Siberia*: Doc. Biol. Sci. Diss. Omsk, 2000. 392 p. (In Russ.).

5. Григорьев А.И. Эколого-физиологические основы адаптации древесных растений в лесостепи Западной Сибири: моногр. Омск: ОмГПУ, 2008. 196 с.

Grigor'ev A.I. *Ecological and Physiological Foundations of Adaptation of Woody Plants in the Forest-Steppe of Western Siberia*: Monograph. Omsk, Omsk State Pedagogical University Publ., 2008. 196 p. (In Russ.).

6. Кладько Ю.В., Бенькова А.В., Скрипальщикова Л.Н. Влияние климатических факторов на радиальный рост сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения г. Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2023. № 5. С. 91–99.

Klad'ko Yu.V., Ben'kova A.V., Skripal'shchikova L.N. Influence of Climatic Factors on Radial Growth of Scots Pine under the Conditions of Technogenic Pollution in the City of Krasnoyarsk. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2023, no. 5, pp. 91–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20230512>

7. Лисеев А.С. Влияние климатических факторов на прирост сосны в Бузулукском бору // Исследования по лесной таксации и лесоустройству. М., 1968. С. 200–208.

Liseev A.S. The Influence of Climatic Factors on Pine Growth in the Buzuluk Pine Forest. *Issledovaniya po lesnoj taksatsii i lesoustrojstvu*. Moscow, 1968, pp. 200–208. (In Russ.).

8. Раскатов П.Б. Прирост годичных побегов сосны как показатель засухи // Докл. АН СССР. 1948. Т. 60, № 7. С. 1257–1259.

Raskatov P.B. The Increment of Annual Pine Shoots as an Indicator of Drought. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1948, vol. 60, no. 7, pp. 1257–1259. (In Russ.).

9. Тихонова И.В., Корец М.А. Изменчивость метеорологических условий произрастания хвойных пород в Средней Сибири с 1960 г. // Лесоведение. 2021. № 2. С. 173–186.

Tikhonova I.V., Korets M.A. A Variability of Meteorological Conditions for the Growth of Coniferous Species in Central Siberia since 1960. *Lesovedenie*, 2021, no. 2, pp. 173–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S002411482102008X>

10. Тольский А.П. К вопросу о выявлении колебаний климата по анализам хода роста деревьев // Тр. по с.-х. метеорологии. Вып. XXIV. Л.: ЦУЕГМЕ, 1936. С. 117–123.

Tol'skij A.P. On the Issue of Identifying Climate Fluctuations by Analyzing the Growth of Trees. *Trudy po sel'skokhozyajstvennoj meteorologii*. Leningrad, Central Administration of the Unified Hydro-Meteorological Network, 1936, pp. 117–123. (In Russ.).

11. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986. 137 с.

Shiyatov S.G. *Dendrochronology of the Upper Forest Limit in the Urals*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 137 p. (In Russ.).

12. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H.(T.), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 259, iss. 4, pp. 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>

13. Berlin M.E., Persson T., Jansson G., Haapanen M., Ruotsalainen S., Barring L., Andersson G.B. Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 3, art. no. 1562. <https://doi.org/10.14214/sf.1562>

14. Davin E.L., Noublet-Ducoudre de N. Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, iss. 1, pp. 97–112. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3102.1>

15. Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, vol. 34, iss. 3, pp. 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>

16. He Y., Huang J., Shugart H.H., Guan X., Wang B., Yu K. Unexpected Evergreen Expansion in the Siberian Forest under Warming Hiatus. *Journal of Climate*, 2017, vol. 30, iss. 13, pp. 5021–5039. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0196.1>

17. Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F.C., Churakova (Sidorova) O., Dürthorn E., Esper J., Hülsmann L., Kirilyanov A.V., Moiseev P., Myglan V.S. Diverse Growth Trends and Climate Responses across Eurasia's Boreal Forest. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, art. no. 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074021>

18. Kirilyanov A.V., Hagedorn F., Knorre A.A., Fedotova E.V., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M., Moiseev P.A., Rigling A. 20th Century Tree-Line Advance and Vegetation Changes along an Altitudinal Transect in the Putorana Mountains, Northern Siberia. *Boreas*, 2012, vol. 41, iss. 1, pp. 56–67. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2011.00214.x>

19. Martínez-Vilalta J., Lopez B.C., Adell N., Badiella L., Ninyerola M. Twentieth Century Increase of Scots Pine Radial Growth in NE Spain Shows Strong Climate Interactions. *Global Change Biology*, 2008, vol. 14, iss. 12, pp. 2868–2881. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01685.x>

20. Mitchell T.D., Jones P.D. An Improved Method of Constructing a Database of Monthly Climate Observations and Associated High-Resolution Grids. *International Journal of Climatology*, 2005, vol. 25, iss. 6, pp. 693–712. <https://doi.org/10.1002/joc.1181>

21. Rehfeldt G.E., Tchepakova N.M., Parfenova Y.I., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, iss. 9, pp. 912–929. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x>

22. Tchepakova N.M., Parfenova E.I., Korets M.A., Conard S.G. Potential Change in Forest Types and Stand Heights in Central Siberia in a Warming Climate. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, no. 3, art. no. 035016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035016>

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

Научная статья

УДК 630\*182

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-134-146

## Алгоритм лесообразовательного процесса в ельниках с учетом лесохозяйственных мероприятий

**Н.Н. Теринов**<sup>1</sup>✉, *д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.*; ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

**В.В. Побединский**<sup>2,3</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [G-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-6318-3447),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>

**Э.Ф. Герц**<sup>2</sup>, *д-р техн. наук, доц.*; ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

**А.В. Мехренцев**<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*; ResearcherID: [AAE-5378-2020](https://orcid.org/0000-0002-2186-0152),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>

**А.Ф. Уразова**<sup>2</sup>, *канд. с.-х. наук, доц.*; ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

**Ю.В. Ефимов**<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*; ResearcherID: [AIA-0678-2022](https://orcid.org/0000-0002-6672-2431),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6672-2431>

<sup>1</sup>Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; [n\\_n\\_terinov@mail.ru](mailto:n_n_terinov@mail.ru)✉

<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 626100; [pobedinskyvv@mail.ru](mailto:pobedinskyvv@mail.ru), [gerz.e@mail.ru](mailto:gerz.e@mail.ru), [mehrentsev@yandex.ru](mailto:mehrentsev@yandex.ru), [urazovaaf@m.usfeu.ru](mailto:urazovaaf@m.usfeu.ru), [efimovyuv@m.usfeu.ru](mailto:efimovyuv@m.usfeu.ru)

<sup>3</sup>Уральский государственный аграрный университет, ул. Карла Либкнехта, д. 42, г. Екатеринбург, Россия, 626100; [pobedinskyvv@mail.ru](mailto:pobedinskyvv@mail.ru)

Поступила в редакцию 26.11.24 / Одобрена после рецензирования 11.02.25 / Принята к печати 14.02.25

**Аннотация.** Исследование вносит вклад в решение проблемы неконтролируемого увеличения площадей производных лиственных насаждений на месте коренных хвойных лесов. Цель – разработать способ создания алгоритма лесообразовательного процесса, включающего систему мероприятий и позволяющего существенно снизить вероятность замены коренных темнохвойных лесов на производные лиственные насаждения. На основании собственных научных изысканий, обобщения опыта других ученых-лесоведов предложена функциональная модель лесообразовательного процесса в темнохвойных лесах. Она представлена в виде графической матричной структурной блок-схемы, построена на принципах, изложенных в работах Б.А. Ивашевича, развитых Б.П. Колесниковым и их последователями, и рассматривает возобновление коренных (условно-коренных) лесов через восстановительно-возрастные смены. Модель предусматривает 2 объективных и наиболее перспективных направления формирования темнохвойных насаждений: без смены хвойных пород на лиственные и через смену 1 поколения лиственных пород. Это матрица, в ячейки которой помещены таксационные характеристики древостоя. При совпадении фактической характеристики таксационного выдела с записанной в матрице открывается текущее состояние насаждения и варианты развития лесного участка на перспективу. Направление лесообразования в сторону формирования темнохвойных насаждений осуществляется за счет рубок ухода и трансформации. Последние представляют собой комплекс мер по целенаправленному уходу за молодыми поколениями хвойных пород, осуществляемых до

© Теринов Н.Н., Побединский В.В., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В., 2026

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

возраста рубки спелых березняков и осинников. В результате значительно снижается вероятность повторного заселения площадей мягколиственными породами и формирования вторично-производного мягколиственного насаждения. Современные информационные технологии позволяют на основе функциональной модели создать цифровой продукт в виде имитационной модели лесообразовательного процесса темнохвойных насаждений. Ее совмещение с существующими программами по учету лесного фонда и практическое применение сделают возможным отслеживание, прогнозирование и направление лесообразовательного процесса в сторону формирования темнохвойных лесов за счет эффективного управления лесохозяйственным производством.

**Ключевые слова:** смена пород, формирование коренных темнохвойных лесов, ельник, моделирование лесообразовательного процесса, рубки ухода, рубки трансформации

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках темы Министерства науки и высшего образования РФ FUWW-2023-0010 (№ 225013105657-5).

**Для цитирования:** Теринов Н.Н., Побединский В.В., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В. Алгоритм лесообразовательного процесса в ельниках с учетом лесохозяйственных мероприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 134–146.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-134-146>

Original article

## The Algorithm of the Forest Formation Process in Spruce Forests, Taking into Account Forestry Measures

*Nikolay N. Terinov*<sup>1</sup>✉, *Doctor of Agriculture, Leading Research Scientist;*

ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

*Vladimir V. Pobedinsky*<sup>2,3</sup>, *Doctor of Engineering, Prof.;*

ResearcherID: [G-3245-2018](https://orcid.org/0000-0001-6318-3447), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>

*Eduard F. Gerts*<sup>2</sup>, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;* ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

*Andrey V. Mekhrentsev*<sup>2</sup>, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAE-5378-2020](https://orcid.org/0000-0002-2186-0152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2186-0152>

*Alina F. Urazova*<sup>2</sup>, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

*Yuri V. Efimov*<sup>2</sup>, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AIA-0678-2022](https://orcid.org/0000-0002-6672-2431), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6672-2431>

<sup>1</sup>Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; [n\\_n\\_terinov@mail.ru](mailto:n_n_terinov@mail.ru)✉

<sup>2</sup>Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 626100, Russian Federation; [pobedinskyvv@mail.ru](mailto:pobedinskyvv@mail.ru), [gerz.e@mail.ru](mailto:gerz.e@mail.ru), [mehrentsev@yandex.ru](mailto:mehrentsev@yandex.ru), [urazovaaf@m.usfeu.ru](mailto:urazovaaf@m.usfeu.ru), [efimovyuv@m.usfeu.ru](mailto:efimovyuv@m.usfeu.ru)

<sup>3</sup>Ural State Agrarian University, ul. Karla Libknekhta, 42, Yekaterinburg, 626100, Russian Federation; [pobedinskyvv@mail.ru](mailto:pobedinskyvv@mail.ru)

Received on November 26, 2024 / Approved after reviewing on February 11, 2025 / Accepted on February 14, 2025

**Abstract.** The study contributes to solving the problem of an uncontrolled increase in the area of derivative deciduous stands in place of indigenous coniferous forests. The aim has been to develop a method for creating an algorithm for the forest formation process, including

a system of measures and allowing for a significant reduction in the likelihood of replacing indigenous dark coniferous forests with derivative deciduous stands. Based on our own scientific research and generalization of the experience of other forest scientists, a functional model of the forest formation process in dark coniferous forests has been proposed. It is presented in the form of a graphical matrix structural block diagram, based on the principles set out in the works by B.A. Ivashkevich, developed by B.P. Kolesnikov and their followers, and considers the renewal of indigenous (conditionally indigenous) forests through restoration-age shifts. The model provides 2 objective and most promising directions for the formation of dark coniferous stands: without changing coniferous species to deciduous ones and through the change of 1 generation of deciduous species. This is a matrix in whose cells the inventory characteristics of the forest stand are placed. If the actual characteristics of the inventory area coincide with those recorded in the matrix, the current state of the stand and options for the future development of the forest area are revealed. The direction of forest formation towards the formation of dark coniferous stands is achieved through thinnings and transformation fellings. The latter are a set of measures for the targeted care of young generations of coniferous species, which are carried out up to the age of felling mature birch and aspen forests. As a result, the likelihood of repopulation of areas with soft-wooded broad-leaved species and the formation of derivative soft-wooded broad-leaved stands is significantly reduced. Modern information technologies make it possible to create a digital product based on a functional model in the form of a simulation model of the forest formation process of dark coniferous stands. Its compatibility with existing forest inventory programs and practical application will allow for monitoring, forecasting, and directing forest formation processes towards the development of dark coniferous forests, effectively managing forestry production.

**Keywords:** species change, formation of indigenous dark coniferous forests, spruce forest, modeling of the forest formation process, thinnings, transformation fellings

**Acknowledgements:** The research was carried out within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation topic FUWW-2023-0010 (no. 225013105657-5).

**For citation:** Terinov N.N., Pobedinsky V.V., Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Urazova A.F., Efimov Yu.V. The Algorithm of the Forest Formation Process in Spruce Forests, Taking into Account Forestry Measures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 134–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-134-146>

### *Введение*

Одним из эффективных методов изучения динамических систем является имитационное моделирование с применением современных компьютерных технологий. Природные объекты (биоресурсы) в этом отношении специфичны и рассматриваются как биологическая система и как объект хозяйственной деятельности. Лесные экосистемы входят в число таких объектов, относятся к категории динамических, непрерывно развивающихся. Знание закономерностей их роста помогает вовремя реагировать на происходящие и ожидаемые процессы в лесных экосистемах, реализовывать поставленные цели лесопользования. В результате обеспечивается сохранность и устойчивость среды обитания. Современная система управления лесами, построенная на нормативных документах, согласованиях, субъективных оценках, затрудняет объективное и оперативное реагирование на ситуацию в режиме реального времени. Вместе с тем современные компьютерные технологии позволяют хранить и накапливать информацию об объекте, контролировать, сопровождать и прогнозировать

процесс лесообразования, принимать управленческие решения с их своевременной реализацией. Широкое распространение при инвентаризации лесного фонда и планировании мероприятий в нем получили методы, основанные на ГИС-технологиях. Следующим логическим шагом в направлении развития цифровых технологий в лесном хозяйстве является создание имитационной модели лесообразовательного процесса, раскрывающей объективные направления развития лесных экосистем.

Описание процессов в лесных насаждениях, их связь с климатом и другими внешними факторами на уровне схем, регрессионных и математических моделей в отечественной и зарубежной научной литературе представлены широко [1–3, 12, 13, 19–23]. Современными средствами отслеживаются этапы последовательной смены растительных сообществ (сукцессий) на определенном участке земной поверхности, которые завершаются образованием устойчивых (климаксовых) насаждений [6, 9]. Однако на лесообразование помимо внешней среды, внутренних взаимодействий между растительными сообществами и отдельными видами древесных пород влияют антропогенные факторы, связанные с хозяйственной деятельностью. Сегодняшний облик лесов во многом определяется этими факторами [4, 24, 25]. В результате функционирование лесных экосистем становится все более сложным и многовекторным. Например, производные леса могут не восстанавливаться коренной породой, а заменяться такими же производными насаждениями другого порядка с более низкой демутационной способностью. Для исключения или существенного снижения вероятности такого развития событий в модель процесса лесообразования необходимо ввести внешний фактор – антропогенный. На практике это означает своевременное принятие управленческих решений и обязательное выполнение хозяйственных мероприятий.

Цель – разработать способ создания алгоритма лесообразовательного процесса, включающего систему мероприятий и позволяющего существенно снизить вероятность замены коренных темнохвойных лесов на производные лиственные насаждения.

#### *Объекты и методы исследования*

Перед созданием имитационной модели лесообразовательного процесса необходимо решить ряд принципиальных вопросов. Так как каждая лесная формация (сосновая, березовая, еловая и т. д.) имеет особенности, необходимо выбрать объект исследования. В нашем случае это еловые и производные от них мягколиственные насаждения. Созданию алгоритма лесообразовательного процесса должна предшествовать разработка алгоритма другого порядка в виде структурной блок-схемы в графическом изображении.

Проблема, на решение которой направлено исследование, следует из неудовлетворительного соотношения площадей хвойных и лиственных лесов с перспективой сохранения этой негативной тенденции: доля производных лиственных насаждений увеличивается [5, 11]. Таким образом, следует предложить систему хозяйства, которая позволит стабилизировать этот процесс, а в перспективе – поддерживать определенное соотношение хвойных и лиственных пород в лесах, исходя из их экологического значения, лесорастительных условий и перспектив развития конкретной территории.

Основой для создания алгоритма лесообразовательного процесса послужила теория, построенная на принципах, изложенных в работах Б.А. Ивашкевича, развитых Б.П. Колесниковым и их последователями. Она базируется на возрождении коренных (условно-коренных) лесов через восстановительно-возрастные смены, т. е. через производные насаждения. Такой подход с учетом региональных особенностей часто называют географо-генетическим. Результаты этой работы реализовались в практическом руководстве «Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области» [10] и «Рекомендациях по ведению лесного хозяйства на зонально-типологической основе в лесах Свердловской области» [8]. Схематично процесс восстановления коренных (условно-коренных) насаждений представлен на рис. 1.

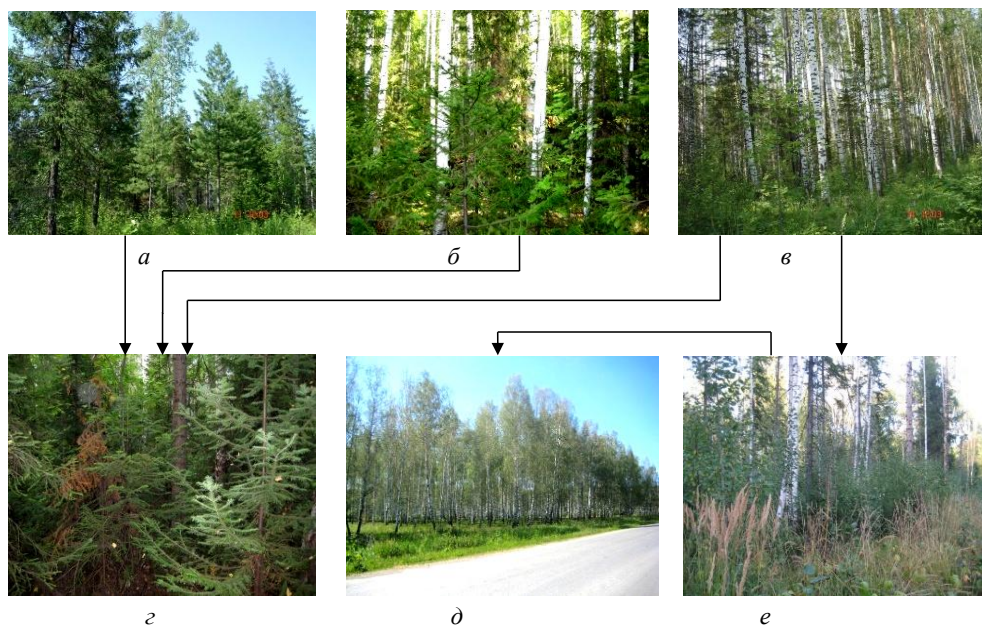


Рис. 1. Лесообразовательный процесс: *a*, *б* – первично-производные насаждения, сформировавшиеся по коротко-производному типу без смены пород из хвойного подроста предварительной генерации и со сменой лиственных пород на хвойные в течение жизни 1 поколения темнохвойных пород соответственно; *в* – вторично-производное насаждение, сформировавшееся по длительно-производному типу со сменой лиственных пород на хвойные в течение жизни 2 поколений темнохвойных пород; *z* – хвойное условно-коренное насаждение; *д* – устойчиво-производное насаждение; *e* – производное насаждение, сформировавшееся по длительно-производному типу со сменой лиственных пород на хвойные в течение жизни нескольких (более 2) поколений темнохвойных пород

Fig. 1. Forest formation process: *a*, *б* – primary derivative stands formed according to the short-derivative type without changing the species from the coniferous undergrowth of the preliminary generation and with the change of deciduous species to coniferous during the life of the 1st generation of dark coniferous species, respectively; *в* – secondary derivative stand formed according to a long-term derivative type with the change of deciduous species to coniferous ones during the life of 2 generations of dark coniferous species; *z* – coniferous conditionally indigenous stand; *д* – stable derivative stand; *e* – derivative stand formed according to a long-term derivative type with the change of deciduous species to coniferous ones during the life of several (more than 2) generations of dark coniferous species

В соответствии с целью исследования (рис. 1, *z*) перспективными являются направления лесообразования по коротко-производному типу через формирование первично-производных насаждений (рис. 1, *a* и *б*). При другом

длительно-производном типе лесообразования (рис. 1, *в* и *е*) возобновление хвойного леса растянуто во времени и вероятность осуществления этого процесса меньше. При неоднократном формировании на одном участке производных лиственных насаждений, например в результате рубок, пожаров, ветровалов, восстановление коренных хвойных лесов возможно только искусственным методом (рис. 1, *д*).

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Алгоритм лесообразовательного процесса в ельниках планируется создать на основе функциональной модели для этой формации, представленной в виде структурной блок-схемы. Ее вариант без детализировки изображен на рис. 2, распространяется на еловые и производные от них мягколиственные насаждения I–III классов бонитета, приуроченные к дренированным почвам. Это брусничниковая, ягодниковая, разнотравная, липняковая и травяно-зеленомошная (при определенных ограничениях) группы типов леса. На схеме для каждого состояния насаждения (обозначено прямоугольником) с экологических и лесоводственных позиций обосновано назначение лесохозяйственных мероприятий (овал) в рамках 2 основных направлений формирования темнохвойных насаждений: без смены хвойных пород на лиственные и через смену I поколения мягколиственных пород. Первая цифра в схеме обозначает направление лесообразования: 1 – без смены пород; 2 – через первично-производное мягколиственное насаждение. Вторая цифра отражает класс возраста хвойных (первое направление) и лиственных (второе направление) древостоев соответственно. Второе направление сопровождается системой рубок трансформации (на схеме обозначена темным тоном), которая, в соответствии с принципами существующей системы рубок ухода, предназначена для восстановления коренных ельников с высокой вероятностью и за более короткие сроки [15, 16]. Пунктирной линией показано нежелательное направление лесообразовательного процесса.

Каждая прямоугольная ячейка является платформой или матрицей, где записаны таксационные характеристики. При совпадении фактической характеристики таксационного выдела с записанной в матрице можно получить представление о направлении лесообразовательного процесса и перспективах развития насаждения. Последствия выполнения или невыполнения мероприятий проявятся при следующем туре инвентаризации лесного фонда (т. е. через 10 лет), когда все лесные участки займут позиции в соответствии с их текущими таксационными характеристиками. Например, позиция х.1.1 – это древостой с составом 4 ед. хвойных пород и 6 ед. лиственных. Такой состав формируется после рубок с сохранением подроста предварительной генерации или при некачественном уходе за лесными культурами. При условии оставления такого состава во 2-м классе возраста (позиция х.1.2) возраст хвойных деревьев будет находиться в пределах 25–40 лет. С целью увеличения в составе древостоя доли хвойных пород проводится рубка переформирования. В процессе развития насаждения велика вероятность повышения количества хвойных деревьев до 5 ед. и более без внешнего вмешательства [7, 14]. В этом случае в зависимости от возраста темнохвойных деревьев переходим к позициям 1.2 и 1.3 без проведения рубки переформирования (позиции 1.2.1 и 1.3.1).

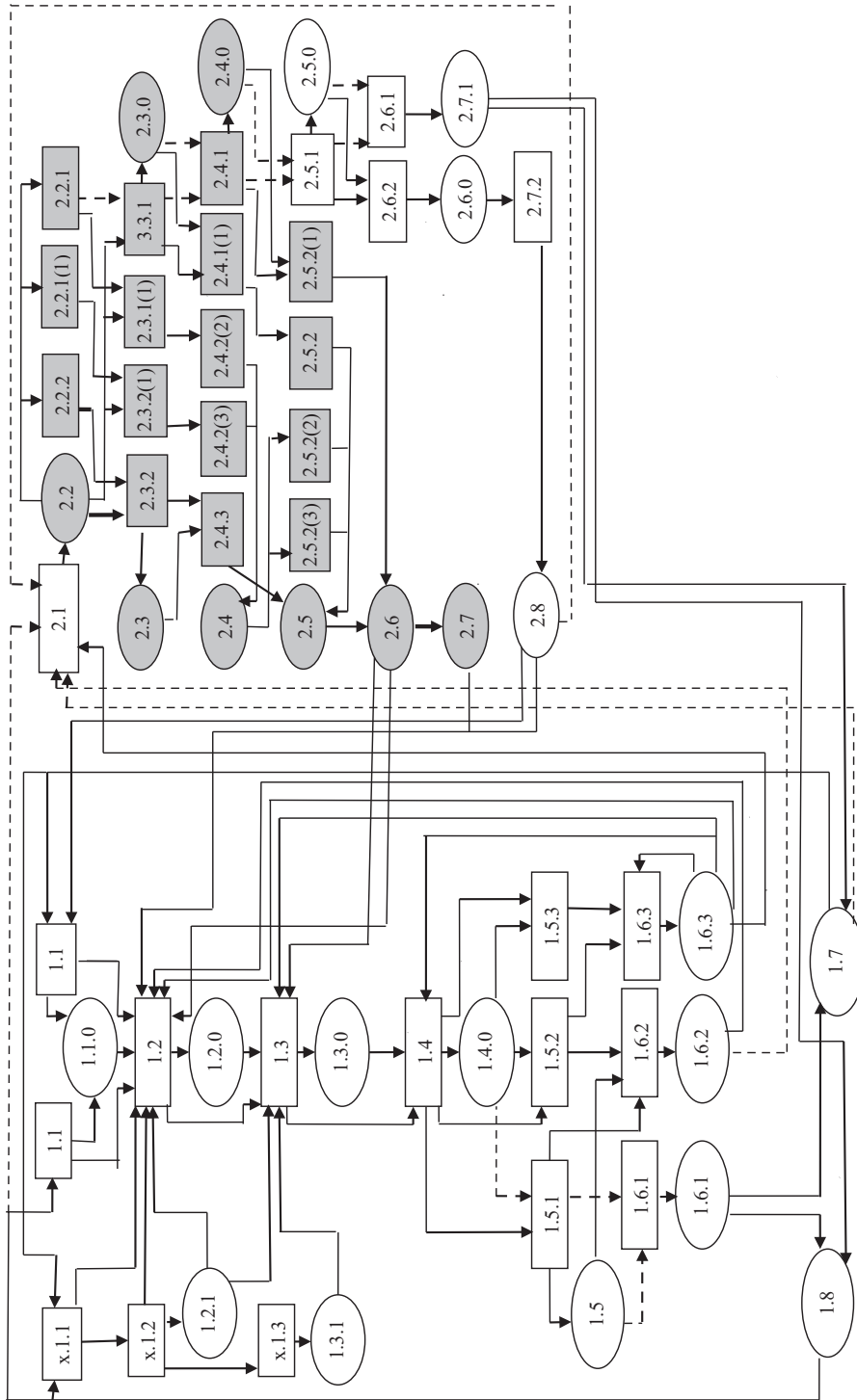


Рис. 2. Схема лесообразования в темных хвойных лесах

Fig. 2. Forest formation pattern in dark coniferous forests

В 3-м классе возраста при сохранении доминирования лиственных пород не стоит откладывать рубку переформирования, т. к. к этому времени у ели и пихты в возрасте 40–60 лет наблюдается максимальный текущий прирост [18]. Более подробно все позиции в схеме, сопровождающие лесообразовательный процесс хозяйственные мероприятия с их обоснованием описаны в диссертации [17].

Как было отмечено, лесообразование по коротко-производному типу и доминирование в перспективе темнохвойных пород после прохода насаждением стадии первично-производного мягколиственного насаждения совершается благодаря системе рубок трансформации (рис. 2, блок 2, тонированная часть). Такая система представляет собой 1 рубку или цикл выборочных рубок с повторением через 8–10 лет до возраста спелости мягколиственных древостоев.

Количество рубок зависит от появления подроста ели, пихты и кедра под пологом лиственных пород. При этом возраст подроста должен находиться в интервале от 15 до 30 лет. Например, единственная рубка трансформации проводится, когда темнохвойный подрост заселяется под пологом 30–35-летних деревьев верхнего лиственного яруса – позиция 2.4.1(1). При возрасте подроста около 15 лет возраст лиственных деревьев будет составлять 45–50 лет (позиция 2.5.2). В цикле рубок трансформации последняя рубка выполняется в 2 приема способом, как правило, 2-приемной равномерно-постепенной или чересполосной постепенной рубки. В 1-м случае за 1-й прием (позиция 2.5) из 1-го яруса вырубается преимущественно хвойные деревья (если они есть в составе древостоя) и наиболее развитые единичные экземпляры березы и осины. Полнота верхнего яруса древостоя снижается до 0,4–0,5 (рис. 3). Этот метод отбора деревьев в рубку существенно улучшает условия для роста темнохвойных деревьев нижнего яруса, уменьшает появление поросли мягколиственных пород и вероятность ветровала. На рис. 4 изображено средневозрастное темнохвойное насаждение, сформировавшееся через 7 лет после второго (заключительного) приема чересполосной постепенной рубки (позиция 2.6).



Рис. 3. Состояние насаждения через 8 лет после 1-й рубки трансформации

Fig. 3. The state of the stand 8 years after the first transformation felling



Рис. 4. Состояние насаждения после чересполосной постепенной рубки

Fig. 4. The state of the stand after gradual alternate strip felling

На рис. 5 представлена схема, по которой можно сравнить период формирования темнохвойных насаждений разными методами. В сопоставлении с действующей схемой рубки трансформации сокращают продолжи-

тельность формирования темнохвойного насаждения минимум на 10–15 лет и с высокой долей вероятности исключают повторное образование древостоя с преобладанием мягколиственных пород (вторично-производное насаждение).

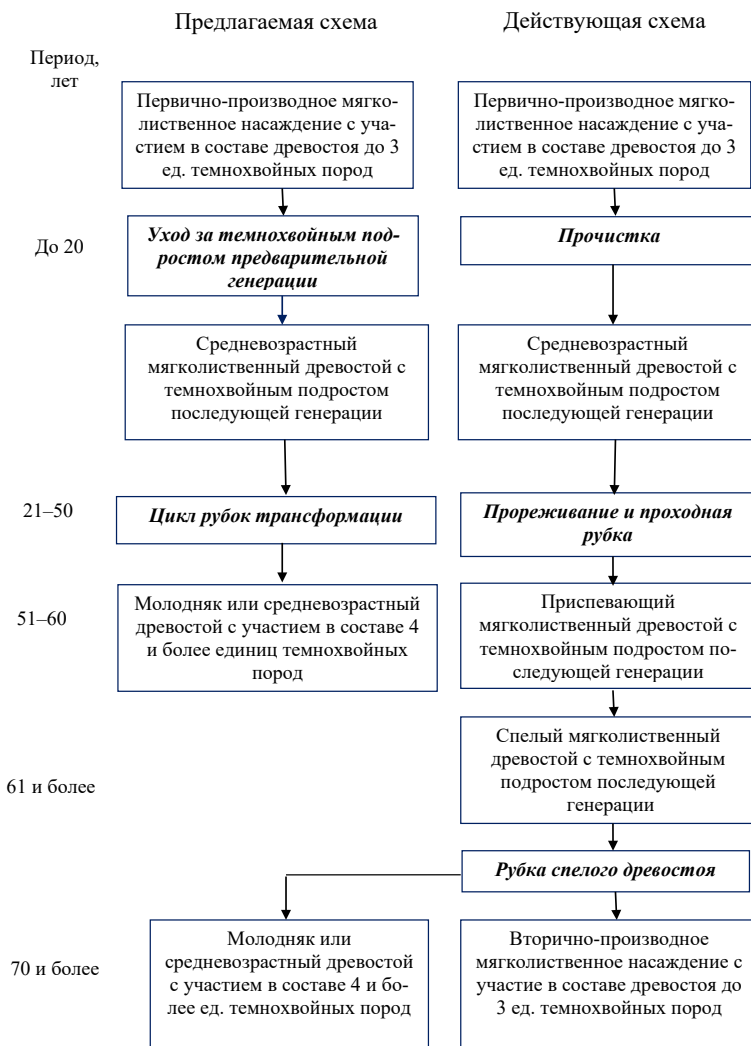


Рис. 5. Схема формирования темнохвойных насаждений рубками трансформации и рубками ухода (действующая)

Fig. 5. The scheme for the formation of dark coniferous stands by transformation fellings and thinnings (current)

При включении антропогенного фактора алгоритм модели лесообразовательного процесса приобретает сложную, нелинейную, вероятностную структуру. С учетом этого при его создании и адекватном отражении необходимы современные методы имитационного моделирования. По нашему мнению, наиболее перспективной средой программирования является Matlab. Этот ресурс обладает широким спектром возможностей. Кроме того, в Matlab интегрирована программа Excel, которая используется при оформлении материалов лесоустройства. Данный ресурс может быть использован при группировке и формировании баз данных, сделать их удобными для дальнейшей

работы. Совместимость такого рода в перспективе позволит создать удобный интерфейс для пользователя и предпосылки для включения программы, имитирующей лесообразовательный процесс, в комплекс с другими программами по планированию и осуществлению хозяйственной деятельности лесных предприятий.

### Заключение

Предложен способ создания алгоритма лесообразовательного процесса для автоматизированной системы, позволяющей отслеживать, сопровождать и корректировать направление лесообразовательного процесса для решения совокупности задач, связанных с возобновлением и формированием темнохвойных коренных древостоев через последовательность восстановительно-возрастных смен. Способ основан на географо-генетическом подходе, изложенном в работах Б.А. Ивашкевича и Б.П. Колесникова. В качестве промежуточного этапа для разработки алгоритма создана функциональная модель лесообразовательного процесса, представляющая собой графическую матричную структурную блок-схему. В ней предусмотрено 2 наиболее перспективных направления формирования темнохвойных насаждений: без смены темнохвойных пород и через доминирование 1 поколения мягколиственных пород, т. е. через формирование первично-производного мягколиственного насаждения. Неотъемлемой частью модели являются лесохозяйственные мероприятия, которые направляют процесс лесообразования в сторону формирования темнохвойных лесов. На основании алгоритма предполагается создание имитационной модели ведения лесного хозяйства в темнохвойных лесах, которая позволит эффективно осуществлять управление лесохозяйственным производством. На 1-м этапе восстановления насаждения это позволит предотвратить увеличения площадей производных мягколиственных насаждений, а в дальнейшем – поддерживать определенное соотношение хвойных и лиственных лесов исходя из их экологического значения, лесорастительных условий и перспектив развития конкретной территории. Создание цифрового продукта такого рода приобретает еще больший научный и практический интерес в связи с тем, что названные подходы и цифровые технологии в практике лесохозяйственного производства не применяются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Атрощенко О.А.* Модели прогноза роста древостоев // Тр. БГТУ. 2013. № 1. С. 3–5.  
Atroshchenko O.A. Tree Growth Forecasting Models. *Trudy BGTU = Proceedings of the Belarusian State Technological University*, 2013, no. 1, pp. 3–5. (In Russ.).
2. *Березовская Ф.С., Карев Г.П.* Моделирование динамики древостоев // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 7–19.  
Berezovskaya F.S., Karev G.P. Modeling of Forest Dynamics. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2015, no. 3, pp. 7–19. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20150302>
3. *Грабарник П.Я., Чертов О.Г., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Быховец С.С., Фролов П.В.* Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы // Математическая биология и биоинформатика. 2019. Т. 14, № 2. С. 488–499.

Grabarnik P.Ya., Chertov O.G., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Khanina L.G., Bobrovskiy M.V., Bykhovets S.S., Frolov P.V. The Integration of Simulation Models for Complex Evaluation of Different Forest Ecosystem Services: Methodological Approaches. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika* = Mathematical Biology and Bioinformatics, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 488–499. (In Russ.). <https://doi.org/10.17537/2019.14.488>

4. Дружинин Ф.Н. К вопросу о смене пород // Лесные ресурсы таежной зоны России: проблемы лесопользования и лесовосстановления: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2009. С. 57–60.

Druzhinin F.N. On the Issue of Changing Species. *Forest Resources of the Taiga Zone of Russia: Problems of Forest Management and Reforestation: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Petrozavodsk, 2009, pp. 57–60. (In Russ.).

5. Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 3(43). С. 45–62.

Ilyintsev A.S., Shamontev I.G., Tretyakov S.V. Modern Dynamics of Forest Use in the Boreal Forests of Russia (for Example of the Arkhangelsk Region). *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 3(43), pp. 45–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/4>

6. Исаев А.С., Суховольский В.Г., Хлебопрос Р.Г., Бузыкин А.И., Овчинникова Т.М. Моделирование лесообразовательного процесса: феноменологический подход // Лесоведение. 2005. № 1. С. 3–11.

Isaev A.S., Suhovol'sky V.G., Khlebopros R.G., Buzykin A.I., Ovchinnikova T.M. Modeling of Forest-Forming Process: Phenomenological Approach. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2005, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.).

7. Исаева Р.П. Особенности формирования молодняков на сплошных концентрированных вырубках в темнохвойных лесах // Леса Урала и хозяйство в них. 1975. Вып. 8. С. 59–69.

Isaeva R.P. Peculiarities of the Formation of Young Stands in Clear-Cut Concentrated Areas in Dark Coniferous Forests. *Lesy Urala i khozyajstvo v nih*, 1975, iss. 8, pp. 59–69. (In Russ.).

8. Исаева Р.П. Рекомендации по ведению лесного хозяйства на зонально – типологической основе в лесах Свердловской области. М.: ВНИИЛМ, 1984. 56 с.

Isaeva R.P. *Recommendations for Forest Management on a Zonal-Typological Basis in the Forests of the Sverdlovsk Region*. Moscow, All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry Publ., 1984. 56 p. (In Russ.).

9. Киселева В.В., Коротков С.А., Скородумов П.В. Тенденции смены породного состава в лесах Лосиноного Острова // Лесн. вестн. / Forestry bulletin. 2016. Т. 20, № 5. С. 65–77.

Kiseleva V.V., Korotkov S.A., Skorodumov P.V. Trends in Species Composition Changes in the Forests of Losinyi Ostrov. *Lesnoy vestnik* = Forestry bulletin, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 65–77. (In Russ.).

10. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. *Forest Growth Conditions and Forest Types of the Sverdlovsk Region*. Sverdlovsk, Ural Scientific Centre of the USSR Academy of Sciences Publ., 1973. 176 p. (In Russ.).

11. Кузнецова Н.Ф., Сауткина М.Ю. Состояние лесов и динамика их породного состава в Центральном федеральном округе // Лесхоз. информ. 2019. № 2. С. 25–45.

Kuznetsova N.F., Sautkina M.Yu. Forest State and Dynamics of their Species Composition in the Central Federal District. *Lesokhozyajstvennaya informatsiya* = Forestry Information, 2019, no. 2, pp. 25–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.03>

12. Мальшев В.В., Мурзинов Ю.В. Моделирование динамики роста насаждений в процессе ухода за лесом // Лесотехн. журн. 2012. № 2. С. 60–65.

Malyshev V.V., Murzinov Yu.V. Modeling the Dynamics of Plant Growth during Forest Management. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2012, no. 2, pp. 60–65. (In Russ.).

13. Михайлов А.В., Шанин В.Н., Безрукова М.Г. Компонентный подход к построению моделей лесных экосистем // Лесоведение. 2010. № 2. С. 69–76.

Mikhailov A.V., Shanin V.N., Bezrukova M.G. A Component Approach to Development of Forest Ecosystem Models. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 2, pp. 69–76. (In Russ.).

14. Синельщиков Р.Г. Развитие лесов, формирующихся на еловых вырубках Среднего Урала // Лесн. хоз-во. 1966. № 4. С. 24–27.

Sinelshchikov R.G. Development of Forests Formed in Spruce Clearings of the Middle Urals. *Lesnoe khozyajstvo*, 1966, no. 4, pp. 24–27. (In Russ.).

15. Теринов Н.Н. Метод формирования темнохвойных лесов // Тр. С.-Петербур. науч.-исследоват. ин-та лесн. хоз-ва. 2013. № 1. С. 64–71.

Terinov N.N. The Method of Formation of Dark-Coniferous Forest Stands. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo institute lesnogo khozyajstva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2013, no. 1, pp. 64–71. (In Russ.).

16. Патент 2007414 РФ, МПК<sup>31</sup> C2. Способ трансформации производных мягколиственных насаждений в темнохвойные: № 2012123574: заявл. 06.06. 2012; опубл. 10.07.2014 / Н.Н. Теринов.

Terinov N.N. *A Method for Transforming Derivative Soft-Leaved Forests into Dark Coniferous Ones*. Patent RF, no. RU 2007414 C2, 2014. (In Russ.).

17. Теринов Н.Н. Концепция трансформации производных мягколиственных насаждений в темнохвойные с целью повышения продуктивности лесов Урала: дис. ... д-ра с.-х. наук. Уфа, 2015. 320 с.

Terinov N.N. *The Concept of Transforming Derivative Soft-Leaved Plantations into Dark-Coniferous Ones in Order to Increase the Productivity of Forests in the Urals*: Doc. Agric Sci. Diss. Ufa, 2015. 320 p. (In Russ.).

18. Теринов Н.Н., Терехов Г.Г., Толкач О.В. Возраст деревьев нижнего яруса для формирования темнохвойных лесов после рубки // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2024. Вып. 247. С. 173–187.

Terinov N.N., Terekhov G.G., Tolkach O.V. The Age of the Lower Store Trees for the Formation of Dark Coniferous Forests after Cutting. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 247, pp. 173–187. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.247.173-187>

19. Anderson-Teixeira K.J., Miller A.D., Mohan J.E., Hudiburg T.W., Duval B.D., DeLucia E.H. Altered Dynamics of Forest Recovery under a Changing Climate. *Global Change Biology*, 2013, vol. 19, iss. 7, pp. 2001–2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.12194>

20. McDowell N.G., Allen C.D., Anderson-Teixeira K., Aukema B.H., Bond-Lamberty B., Chini L., Clark J.S., Dietze M., Grossiord C., Hanbury-Brown A., Hurtt G.C., Jackson R.B., Johnson D.J., Kueppers L., Lichstein J.W., Ogle K., Poulter B., Pugh T.A.M., Seidl R., Turner M.G., Uriarte M., Walker A.P., Xu C. Pervasive Shifts in Forest Dynamics in a Changing World. *Science*, 2020, vol. 368, no. 6494, art. no. eaaz9463.

<https://doi.org/10.1126/science.aaz9463>

21. Pretzsch H., Forrester D.I., Rötzer T. Representation of Species Mixing in Forest Growth Models. A Review and Perspective. *Ecological Modelling*, 2015, vol. 313, pp. 276–292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.044>

22. Seidl R., Fernandes P.M., Fonseca T.F., Gillet F., Jönsson A.M., Merganicová K., Netherer S., Arpaci A., Bontemps J.-D., Bugmann H., González-Olabarria J.R., Lasch P., Meredieu C., Moreira F., Schelhaas M.-J., Mohren F. Modelling Natural Disturbances in Forest Ecosystems: a Review. *Ecological Modelling*, 2011, vol. 222, iss. 4, pp. 903–924.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040>

23. Shvidenko A., Shechepashchenko D.G., Nilsson S., Bouloui Y. System of Models of Growth and Dynamics of Productivity of Russian Forests (Yield Tables). *Forest Management*, 2003, no. 6, pp. 34–38.

24. Tonteri T., Salemaa M., Rautio P., Hallikainen V., Korpela L., Merilä P. Forest Management Regulates Temporal Change in the Cover of Boreal Plant Species. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 381, pp. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.015>

25. Xu H., Li Y., Liu S., Zang R., He F., Spence J.R. Partial Recovery of a Tropical Rain Forest a Half-Century after Clear-Cut and Selective Logging. *Journal of Applied Ecology*, 2015, vol. 52, no. 4, pp. 1044–1052. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12448>

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



ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Научная статья

УДК 629.11.02/098

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-147-160

**Характеристики пневмогидравлического  
рекуперативного коникового устройства лесовозного тягача  
с прицепом-ропуском**

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

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

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

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

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

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

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

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

**А.Е. Матяшов, аспирант;** ResearcherID: [LPP-4512-2024](https://orcid.org/0000-0002-3505-7483),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3505-7483>

**Е.В. Поздняков, канд. техн. наук, доц.;** ResearcherID: [AAX-9199-2020](https://orcid.org/0000-0003-3904-867x),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru<sup>✉</sup>, victorvpo@mail.ru, mayu1964@mail.ru, matyashov-a@bk.ru, pozd.ev@yandex.ru

---


Поступила в редакцию 22.11.24 / Одобрена после рецензирования 13.02.25 / Принята к печати 16.02.25

---

**Аннотация.** Описаны последствия эксплуатации автопоездов в составе тягачей с прицепами-ропусками в сложных дорожных условиях. Приведены перспективные научные направления, способствующие повышению эффективности работы тягачей с прицепными звеньями. Рассмотрены преимущества разработанного пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой для лесовозного тягача с прицепом-ропуском. Целью работы является исследование влияния параметров пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой на его эффективность и определение их оптимальных значений. На основе математической модели и реализующей ее компьютерной программы выполнена оптимизация конструктивных параметров шаровой опоры пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства, обеспечивающая минимальную амплитуду раскачивания верхней части груженых лесоматериалов и максимальную рекуперированную устройством мощность. Выявлено, что оптимальное плечо расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства при фиксированном плече расположения нижних точек крепления гидроцилиндров 0,35 м составляет 0,35...0,45 м, при этом обеспечиваются средняя рекуперированная

---

© Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Матяшов А.Е., Поздняков Е.В., 2026

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

мощность более 13 кВт и амплитуда бокового смещения груза менее 0,27 м. Установлено, что наилучший диапазон давления рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора – 35...50 МПа, рекуперлируемая устройством мощность в этом случае превышает 12,2 кВт, а амплитуда бокового смещения груженных лесоматериалов равняется не более 0,29 м. По результатам 2-факторной оптимизации наилучшее плечо расположения верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,37...0,58 м, а давление рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора – 35...50 МПа. При этом предлагаемое пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство генерирует мощность более 15 кВт, а амплитуда бокового смещения груза не превышает 0,2 м.

**Ключевые слова:** лесовозные дороги, гидроцилиндр, прицеп-ропуск, лесоматериалы, оптимизация, шаровая опора, компьютерный эксперимент, рекуперлируемая мощность, тягач, кониковое устройство, амплитуда бокового смещения, рабочая жидкость

**Для цитирования:** Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Матяшов А.Е., Поздняков Е.В. Характеристики пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 147–160. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-147-160>

Original article

## Characteristics of the Pneumohydraulic Recuperative Conical Device of a Hauling Tractor with a Pole Trailer

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

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

*Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;* ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

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

*Aleksey E. Matyashov, Postgraduate Student;* ResearcherID: [LPP-4512-2024](https://orcid.org/0000-0002-3505-7483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3505-7483>

*Evgeny V. Pozdnyakov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAX-9199-2020](https://orcid.org/0000-0003-3904-867x), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru<sup>✉</sup>, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, matyashov-a@bk.ru, pozd.ev@yandex.ru

Received on November 22, 2024 / Approved after reviewing on February 13, 2025 / Accepted on February 16, 2025

**Abstract.** The consequences of operating road trains consisting of tractors with pole trailers in difficult road conditions have been described. Promising scientific directions have been presented contributing to increasing the efficiency of tractors with trailed links. The advantages of the developed pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint for a hauling tractor with a pole trailer have been considered. The aim of the work has been to

study the influence of the parameters of a pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint on its efficiency and to determine their optimal values. Based on a mathematical model and the computer program implementing it, the design parameters of the ball joint of a pneumohydraulic recuperative conical device have been optimized, ensuring a minimum swing amplitude of the upper part of loaded timber and the maximum power recuperated by the device. It has been revealed that the optimal lever of the upper attachment points of the hydraulic cylinders in the ball joint of the conical device with a fixed lever of the lower attachment points of the hydraulic cylinders of 0.35 m is 0.35...0.45 m, while providing an average recuperated power of more than 13 kW and an amplitude of lateral displacement of the load less than 0.27 m. It has been established that the best pressure range of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator is 35...50 MPa, the power recuperated by the device in this case exceeds 12.2 kW, and the amplitude of lateral displacement of the loaded timber is no more than 0.29 m. According to the results of 2-factor optimization, the best lever of the upper points of the hydraulic cylinders in the ball joint of the conical device is 0.37 ... 0.58 m, and the pressure of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator is 35 ... 50 MPa. At the same time, the proposed pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint generates a power of more than 15 kW, and the amplitude of the lateral displacement of the load does not exceed 0.2 m.

**Keywords:** logging road, hydraulic cylinder, pole trailer, timber, optimization, ball joint, computer experiment, recuperated power, tractor, conical device, lateral displacement amplitude, hydraulic fluid

**For citation:** Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Manukovskii A. Yu., Matyashov A.E., Pozdnyakov E.V. Characteristics of the Pneumohydraulic Recuperative Conical Device of a Hauling Tractor with a Pole Trailer. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 147–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-147-160>

### *Введение*

Важным элементом хозяйственного освоения территорий богатых лесными ресурсами является наличие развитой транспортной инфраструктуры, которая включает в себя магистральные лесовозные дороги со сроком службы 20 и более лет, лесовозные дороги в виде веток – от 5 до 10 лет, а также временные лесовозные дороги в виде усов – 1–2 года. Из общей сети постоянных и временных лесовозных дорог 4 % приходится на магистрали, 13 % – на ветки и 83 % – на временные лесовозные дороги. Одной из основных проблем, сдерживающих развитие лесопромышленного комплекса России, является низкий уровень развития и обустроенности лесовозных дорог, особенно временных. Плохое состояние лесовозных дорог ведет к недоиспользованию лесного фонда, снижению производительности труда, ограничению объемов круглогодичного транспортирования по ним лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом, снижению эффективности функционирования лесовозных автопоездов вследствие частых поломок, качества лесоматериалов за счет их повреждения при транспортировании, увеличению конечной себестоимости вывозимых лесоматериалов из-за роста расходов на лесовозные автопоезда при использовании неоптимального маршрута транспортирования [4].

Эффективность применения лесовозных тягачей с прицепами-ропусками зависит прежде всего от соответствия их конструкции дорожным и природно-климатическим условиям эксплуатации. Дорожные условия исполь-

зования лесовозных тягачей с прицепами-ропусками оказывают наиболее сильное влияние на нагруженность его основных узлов и деталей. Традиционные конструкции кониковых поворотных устройств отечественного и зарубежного производства не обеспечивают достаточного снижения динамических нагрузок, возникающих между звеньями лесовозных автопоездов при их движении в условиях плохо обустроенных лесовозных дорог. В результате этого срок службы лесовозных тягачей с прицепами-ропусками неоправданно сокращается, уменьшение пробега лесовозных автопоездов, вызванное преждевременным износом и разрушением его отдельных деталей и узлов, происходит в основном при переходных, а также неустановившихся режимах движения. Поэтому совершенствование напрямую влияющих на производительность конструкций поворотных кониковых устройств для лесовозных тягачей, направленное на повышение их эффективности, является актуальной задачей [6, 7].

Анализ результатов исследований, выполненных российскими и зарубежными учеными в области повышения эффективности тягачей с прицепными звеньями, позволил установить, что существенного улучшения эффективности их функционирования можно достичь за счет: оснащения автопоездов электронными системами мониторинга их эксплуатационных параметров; увеличения полезной нагрузки и снижения массы лесовозного автопоезда; уточнения установленных ограничений на общий вес лесовозных автопоездов; сокращения времени нахождения автопоезда на лесозаготовительных площадках и лесопромышленных предприятиях; планирования поставок лесоматериалов на первичную переработку; совершенствования способа определения объема лесоматериалов; обоснованного выбора мест и средств погрузки лесоматериалов на автопоезд; совершенствования конструкций тормозных механизмов и прицепных звеньев автопоездов; автоматизации движения тягача с прицепным звеном задним ходом; снижения нагрузки на водителя и улучшения визуального контроля с его стороны путем оптимального чередования работы с отдыхом [8–20].

Многочисленные исследования, выполненные авторами в рамках разработки рекуперативных гидроприводов и рекуперативных сцепных устройств для лесовозного автомобильного транспорта, позволили предложить пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой (рис. 1). Использование такого устройства на лесовозном тягаче с прицепом-ропуском при вывозке лесоматериалов в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог дает возможность: уменьшить влияние динамических нагрузок, возникающих между звеньями автопоезда при неустановившихся режимах движения; рекуперировать кинетическую энергию от масс звеньев с последующим применением преобразованной и накопленной энергии рабочей жидкости в гидравлическом технологическом оборудовании автопоезда; сократить расход топлива тягачом; повысить надежность рамы тягача и деталей коникового устройства; улучшить за счет повышения плавности хода автопоезда комфортность при движении [5].

Целью исследования является оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой для лесовозного тягача с прицепом-ропуском.

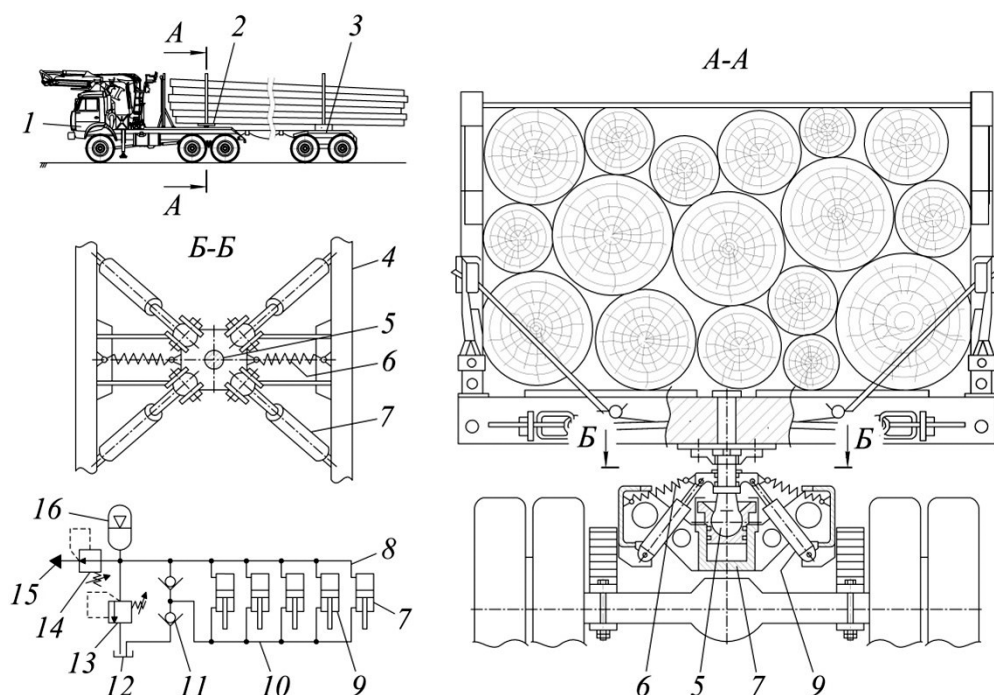


Рис. 1. Схема размещения пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой на лесовозном тягаче с прицепом-ропуском:

1 – тягач; 2 – кониковое устройство; 3 – ропуск; 4 – рама тягача; 5 – шаровая опора; 6 – пружина; 7 – опорный гидроцилиндр; 8, 10 – трубопроводы; 9 – гидроцилиндр; 11 – обратный клапан; 12 – гидробак; 13, 14 – предохранительный и редуционный клапаны; 15 – порт; 16 – пневмогидроаккумулятор

Fig. 1. The layout of a pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint on a hauling tractor with a pole trailer: 1 – tractor; 2 – conical device; 3 – pole trailer; 4 – tractor frame; 5 – ball joint; 6 – spring; 7 – support hydraulic cylinder; 8, 10 – pipelines; 9 – hydraulic cylinder; 11 – check valve; 12 – hydraulic tank; 13, 14 – safety and pressure-reducing valves; 15 – port; 16 – hydropneumatic accumulator

#### Объекты и методы исследования

Объект исследования – пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой, установленное на лесовозном тягаче с прицепом-ропуском. Предмет – оптимальные конструктивные параметры шаровой опоры пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства, обеспечивающие минимальную амплитуду  $A_{\text{bund.iim}}$  раскачивания верхней части грузеных лесоматериалов (груза) и максимальную рекуперированную устройством мощность  $N_{\text{rec.pow}}$ . Для изучения влияния плеча  $R_v$ , расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры и давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора на эффективность пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой разработаны математическая модель и реализующая ее компьютерная программа [1–3].

Особенностью предложенного технического решения является расположение вокруг шаровой опоры коникового устройства 4 гидроцилиндров, обеспечивающих дополнительное силовое взаимодействие между лесовозным

тягачом и грузом. При этом одними из наиболее важных конструктивных параметров такого коникового устройства являются плечи  $R_n$  и  $R_v$  расположения нижних и верхних точек крепления гидроцилиндров.

Из конструктивных соображений плечо  $R_n$  нижних точек крепления гидроцилиндров было принято фиксированным и составляло 0,35 м. Плечо  $R_v$  для верхних точек крепления гидроцилиндров изменялось в серии из 11 компьютерных экспериментов от 0,1 до 0,6 м с шагом 0,05 м. Как видно из рис. 2, в серии экспериментов охватывались случаи, когда верхняя квадратная пластина крепления гидроцилиндров была как меньше (рис. 2, *a, z*), так и больше нижней (рис. 2, *в, e*).

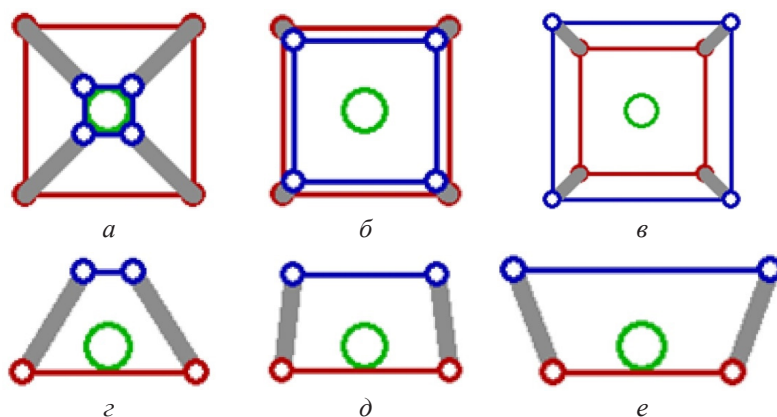


Рис. 2. Конфигурация пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой при различных плечах крепления верхних штоковых шарниров гидроцилиндров: *a–в* – проекции *XY*; *z–e* – *XZ*; *a, z* –  $R_v = 0,1$  м; *б, д* –  $R_v = 0,3$  м; *в, e* –  $R_v = 0,5$  м

Fig. 2. The configuration of a pneumohydraulic recuperative conical device with a ball joint for different mounting levers of the upper rod hinges of the hydraulic cylinders: *a–в* – projections *XY*; *z–e* – *XZ*; *a, z* –  $R_v = 0.1$  m; *б, д* –  $R_v = 0.3$  m; *в, e* –  $R_v = 0.5$  m

Средняя мощность  $N_{\text{rec.pow}}$ , выделяемая пневмогидравлическим рекуперативным кониковым устройством с шаровой опорой, определялась путем усреднения мгновенной мощности, которая рассчитывалась через параметры поступления рабочей жидкости в пневмогидроаккумулятор:

$$N_{\text{rec.pow}} = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} Q_{\text{pn.hydr}}(\tau) \cdot P_{\text{pn.hydr}}(\tau),$$

где  $Q_{\text{pn.hydr}}(\tau)$  – текущий расход рабочей жидкости, поступающей из полостей гидроцилиндров шаровой опоры в полость с рабочей жидкостью пневмогидроаккумулятора;  $\tau$ ,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – шаги интегрирования по времени;  $P_{\text{pn.hydr}}(\tau)$  – текущее давление рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе.

Амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  раскачивания верхней части груза лесовозного тягча с прицепом-ропуском определялась по следующей зависимости:

$$A_{\text{bund.tim}} = \max_{\tau_1 < \tau < \tau_2} |y|,$$

где  $y$  – поперечная координата одной из моделируемых точек груза;  $|\dots|$  – оператор выделения абсолютного значения числа.

Многофакторная оптимизация позволила изучить одновременное влияние нескольких параметров предлагаемого пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства на его эффективность и определить оптимальные области конструктивных параметров. Для проведения 2-факторной оптимизации выбраны следующие 2 конструктивных параметра: плечо расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства  $R_v$ ; давление пневмогидроаккумулятора  $P_{\text{pn.hydr}}$ . Для оптимизации параметров шаровой опоры пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства выполнена серия экспериментов в разработанной компьютерной программе. При осуществлении экспериментов плечо  $R_v$  изменяли на уровнях 0,2, 0,4, 0,6 м, а давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  – 10, 30, 50 МПа (табл. 1). При этом скорость движения лесовозного автопоезда была принята равной 20 км/ч, масса груза – 20 т, средняя высота неровностей опорной поверхности – 0,2 м.

Таблица 1

**Результаты оптимизационной серии компьютерных экспериментов**  
**The results of an optimization series of computer experiments**

Номер эксперимента	$R_v$ , м	$P_{\text{pn.hydr}}$ , МПа	$N_{\text{rec.pow}}$ , кВт	$A_{\text{bund.tim}}$ , м
1	0,2	10	5,34	0,38
2	0,2	30	9,80	0,35
3	0,2	50	9,28	0,23
4	0,4	10	7,32	0,26
5	0,4	30	14,79	0,23
6	0,4	50	16,56	0,16
7	0,6	10	6,17	0,21
8	0,6	30	12,50	0,19
9	0,6	50	14,21	0,14

Аналитическим образом задачу оптимизации параметров пневмогидравлического рекуперативного поворотного коникового устройства с шаровой опорой можно записать в виде следующей системы:

$$\begin{cases} N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) \rightarrow \max; \\ A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow R_v^{\text{opt}}, P_{\text{pn.hydr}}^{\text{opt}},$$

где  $R_v^{\text{opt}}$ ,  $P_{\text{pn.hydr}}^{\text{opt}}$  – оптимальные плечо  $R_v$  расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства и давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора соответственно.

Благоприятными считаются такие режимы движения лесовозного автопоезда, оснащенного пневмогидравлическим рекуперативным поворотным кониковым устройством, при которых в определенной области факторного пространства  $(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  средняя рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  будет максимальной, а амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  раскачивания верхней части груза – минимальной.

В результате проведения экспериментов в компьютерной программе выявлены аналитические зависимости для функций  $N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  и  $A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$ . Такие зависимости имеют вид многочленов 2-го порядка:

$$K(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) = k_1 R_v^2 + k_2 P_{\text{pn.hydr}}^2 + k_3 R_v P_{\text{pn.hydr}} + k_4 R_v + k_5 P_{\text{pn.hydr}} + k_6,$$

где  $K$  – критерий оптимизации ( $N_{\text{rec.pow}}, A_{\text{bund.tim}}$ );  $k_1 \dots k_6$  – параметры полинома.

Расчет параметров полинома выполняется на основе метода наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{comp.ex}}} \left( K_{\text{analytic}}(R_v^i, P_{\text{pn.hydr}}^i) - K_{\text{comp.ex}}^i(R_v^i, P_{\text{pn.hydr}}^i) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где  $i$  – номер эксперимента в компьютерной программе;  $N_{\text{comp.ex}}$  – количество экспериментов;  $K_{\text{analytic}}$  – искомая полиномиальная зависимость критерия  $K$  от исследуемых факторов  $R_v$  и  $P_{\text{pn.hydr}}$ ;  $K_{\text{comp.ex}}^i$  – критерий  $K$  в  $i$ -м эксперименте с параметрами  $R_v^i, P_{\text{pn.hydr}}^i$ .

Под давлением  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора понимается такое настраиваемое рекуперативным гидроприводом давление, ниже которого рабочая жидкость не поступает из гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства в пневмогидравлический аккумулятор. Чем выше давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости, тем реже при движении по неровной дороге проявляется насосный эффект, однако тем больше такие порции гидравлической энергии. Это связано с тем, что рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  пропорциональна как расходу рабочей жидкости, так и давлению, под которым производится этот расход.

Для изучения влияния давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора на эффективность предлагаемого пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства проведена серия из 12 компьютерных экспериментов, в которых давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  изменяли от 5 до 60 МПа с шагом 5 МПа.

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные аналитические зависимости для функций  $N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  и  $A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$ , характеризующие эффективность предлагаемого пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) &= -83,5 R_v^2 - 0,006375 P_{\text{pn.hydr}}^2 + \\ &+ 0,256 R_v P_{\text{pn.hydr}} + 66,162 R_v + 0,457 P_{\text{pn.hydr}} - 9,557; \\ A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}}) &= 0,833 R_v^2 - 6,667 \cdot 10^{-5} P_{\text{pn.hydr}}^2 + \\ &+ 0,005 R_v P_{\text{pn.hydr}} - 1,167 R_v - 6,667 \cdot 10^{-4} P_{\text{pn.hydr}} + 0,588, \end{aligned}$$

где единицами измерения  $R_v$  являются метры,  $P_{\text{pn.hydr}}$  – мегапаскали,  $N_{\text{rec.pow}}$  – киловатты,  $A_{\text{bund.tim}}$  – метры.

Зависимость рекуперированной мощности  $N_{\text{rec.pow}}$  от плеча  $R_v$  имеет выраженный максимум в диапазоне плеча  $R_v$  от 0,35 до 0,45 м (рис. 3, а). Установлено, что при слишком малом плече  $R_v$  обеспечиваются недостаточно высокий ход поршней гидроцилиндров, а при чрезмерно большом – недостаточные силы, способствующие перемещению поршней гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства. При увеличении плеча  $R_v$  от 0,1 до 0,6 м амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза уменьшается с 0,42 до 0,21 м (рис. 3, б). Это можно объяснить тем, что при малом плече  $R_v$  гидроцилиндры оказывают неудовлетворительное стабилизирующее действие на качающийся на шаровой опоре коникового устройства груз, что сопровождается ее более сильным раскачиванием.

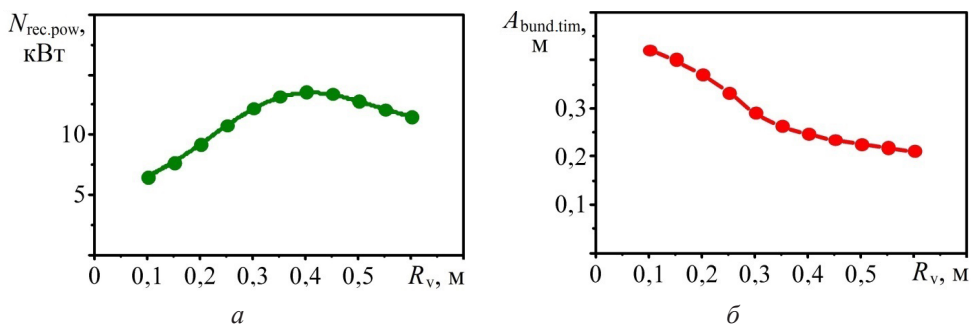


Рис. 3. Влияние плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  шаровой опоры коникового устройства на среднюю рекуперированную мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) и амплитуду бокового смещения груза  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Fig. 3. The influence of the lever of the upper attachment points in the hydraulic cylinders  $R_v$  of the ball joint of the conical device on the average recuperated power  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) and the amplitude of the lateral displacement of the load  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Оптимальное плечо  $R_v$  верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры составляет 0,35...0,45 м, при этом обеспечивается средняя рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  более 13 кВт, и амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза менее 0,27 м.

Установлено, что для увеличения рекуперированной мощности  $N_{\text{rec.pow}}$  оптимальный диапазон давлений  $P_{\text{pn.hydr}}$  составляет 30...50 МПа (рис. 4, а). В данном диапазоне рекуперированная мощность равна 11,9...12,5 кВт. Снижение мощности при низких давлениях объясняется тем, что, хотя порции рабочей жидкости часто поступают в пневмогидравлический аккумулятор, поддерживаемое низким давлением  $P_{\text{pn.hydr}}$  не позволяет получить высокие произведения расхода на давление. При большом давлении  $P_{\text{pn.hydr}}$  порции рабочей жидкости слишком редки – только в случае преодоления нечасто встречающихся высоких неровностей опорной поверхности – и поэтому произведение расхода на давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  оказывается низким из-за малого значения первого показателя.

Амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза имеет почти постоянное высокое значение около 0,32 м в области малых давлений  $P_{\text{pn.hydr}}$  10...25 МПа (рис. 4, б). При дальнейшем увеличении давления с 30 до 60 МПа амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  быстро уменьшается с 0,31 до 0,14 м. С ростом давления рабочая жидкость чаще оказывается запертой в полостях гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства, снижается их податливость, и гидроцилиндры ока-

зывают большее стабилизирующее действие на груз, предотвращая его крен. Оптимальный диапазон давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  пневмогидроаккумулятора составляет 35...50 МПа, при этом рекуперированная мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  превышает 12,2 кВт, а амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза равняется не более 0,29 м.

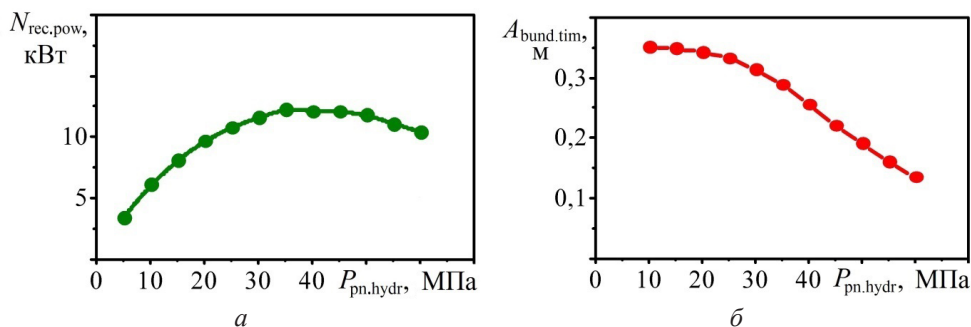


Рис. 4. Влияние давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе на среднюю рекуперированную мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) и амплитуду бокового смещения груза  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Fig. 4. The influence of the pressure  $P_{\text{pn.hydr}}$  of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator on the average recuperated power  $N_{\text{rec.pow}}$  (a) and the amplitude of the lateral displacement of the load  $A_{\text{bund.tim}}$  (b)

Анализ функции  $N_{\text{rec.pow}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  и  $A_{\text{bund.tim}}(R_v, P_{\text{pn.hydr}})$  выполнен с помощью графиков (рис. 5) и картограмм (рис. 6) оптимизации. Графики дают возможность выявить тенденции влияния конструктивных параметров пневмогидравлического рекуперативного коникового устройства с шаровой опорой на его эффективность. Картограммы оптимизации позволяют графоаналитическим методом определить показатели эффективности коникового устройства с шаровой опорой.

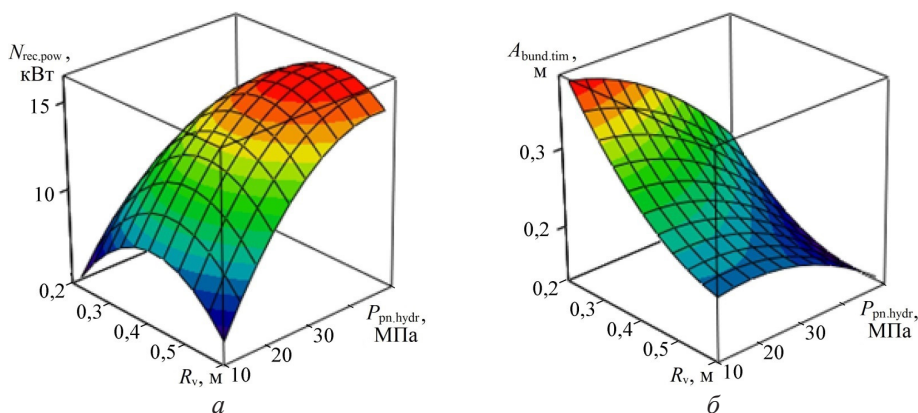


Рис. 5. Графики влияния плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  и давления  $P_{\text{pn.hydr}}$  рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе на среднюю рекуперированную мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  (а) и амплитуду бокового смещения груза  $A_{\text{bund.tim}}$  (б)

Fig. 5. The graphs of the influence of the lever of the upper attachment points of the hydraulic cylinders  $R_v$  and the pressure  $P_{\text{pn.hydr}}$  of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator on the average recuperated power  $N_{\text{rec.pow}}$  (a) and the amplitude of the lateral displacement of the load  $A_{\text{bund.tim}}$  (b)

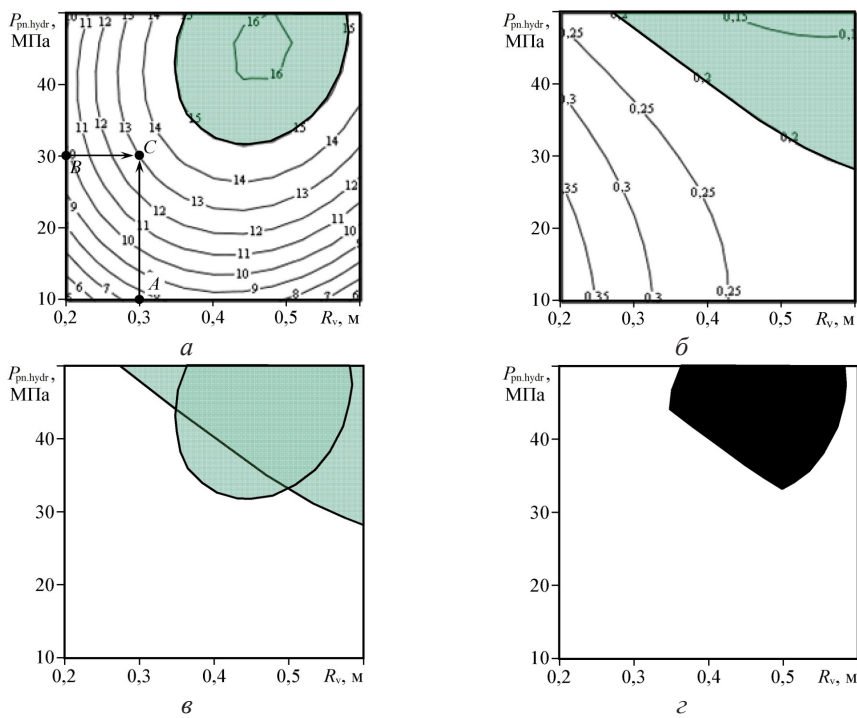


Рис. 6. Картограммы оптимизации плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  шаровой опоры, обеспечивающего максимальную рекуперированную мощность  $N_{rec.pow}$  в зависимости от давления  $P_{pn.hydr}$  рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе и амплитуды  $A_{bund.tim}$  бокового смещения груза:

$$a - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ кВт}; \quad б - A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ м};$$

$$в - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}) \cap A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}); \quad г - \text{оптимальная область}$$

Fig. 6. The cartograms of the optimization of the lever of upper attachment points of the hydraulic cylinders  $R_v$  of the ball joint, providing the maximum recuperated power  $N_{rec.pow}$  depending on the pressure  $P_{pn.hydr}$  of the hydraulic fluid in the hydropneumatic accumulator and the amplitude  $A_{bund.tim}$  of the lateral displacement of the load:

$$a - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ kW}; \quad б - A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}), \text{ m};$$

$$в - N_{rec.pow}(R_v, P_{pn.hydr}) \cap A_{bund.tim}(R_v, P_{pn.hydr}); \quad г - \text{optimal area}$$

На рис. 6, *a* приведен пример использования картограммы. Если плечо  $R_v$  верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства – 0,3 м (точка *A*) и давление  $P_{pn.hydr}$  рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора составляет 30 МПа (точка *B*), то, проводя из данных точек параллельные линии относительно осей координат, находим точку их пересечения *C*. Эта точка лежит на уровне  $N_{rec.pow} = 13$  кВт. Аналогично осуществляется поиск амплитуды  $A_{bund.tim}$  бокового смещения груза. Основным критерием, определяющим благоприятные области, является возможность пересечения 2 картограмм, которая показывает общую оптимальную область (рис. 6, *в*). На картограмме оптимизации плеча расположения верхних точек крепления гидроцилиндров  $R_v$  шаровой опоры, обеспечивающего максимальную рекуперированную мощность  $N_{rec.pow}$  в зависимости от давления  $P_{pn.hydr}$  рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе и амплитуды  $A_{bund.tim}$

бокового смещения груза, линия  $N_{\text{rec.pow}} = 15$  кВт разделяет друг относительно друга благоприятную и неблагоприятную области (рис. 6, а). Для критерия  $A_{\text{bund.tim}}$  линией, разграничивающей благоприятную и неблагоприятную области, принята  $A_{\text{bund.tim}} = 0,2$  м (рис. 6, б).

По расположению выделенной черным цветом оптимальной области (рис. 6, в) в исследуемом факторном пространстве видно, что оптимальное плечо  $R_v$  для верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,37...0,58 м, давление  $P_{\text{pn.hydr}}$  пневмогидравлического аккумулятора – 35... 50 МПа. При этом предлагаемое пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой генерирует мощность  $N_{\text{rec.pow}}$  более 15 кВт, а амплитуда  $A_{\text{bund.tim}}$  бокового смещения груза не превышает 0,2 м.

### Выводы

1. Повышения эффективности работы тягачей с прицепными звеньями можно достичь за счет: оснащения автопоезда электронными системами мониторинга эксплуатационных параметров; увеличения полезной нагрузки и полной массы лесовозного автопоезда; уточнения ограничений на общий вес лесовозного автопоезда; сокращения времени нахождения автопоезда на погрузке леса; использования более совершенного способа определения объема и массы загружаемых на автопоезд лесоматериалов; обоснованного выбора мест и средств погрузки лесоматериалов на автопоезд; совершенствования конструкций тормозных механизмов и прицепных звеньев автопоезда; снижения нагруженности водителя тягача путем оптимального чередования его работы с отдыхом.

2. Предложено пневмогидравлическое рекуперативное кониковое устройство с шаровой опорой для лесовозного тягача с прицепом-ропуском, использование которого дает возможность: уменьшить влияние динамических нагрузок, возникающих между звеньями автопоезда при его неустановившихся режимах движения; рекуперировать кинетическую энергию от масс звеньев с последующим использованием преобразованной и накопленной энергии рабочей жидкости в гидравлическом технологическом оборудовании лесовозного автопоезда; сократить расход топлива; повысить надежность рамы тягача и деталей коникового устройства; создать за счет повышения плавности хода автопоезда более комфортные условия для водителя.

3. Оптимальное плечо расположения верхних точек крепления гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства при фиксированном плече расположения нижних точек крепления гидроцилиндров 0,35 м составляет 0,35...0,45 м, при этом обеспечивается средняя рекуперлируемая мощность более 13 кВт и амплитуда бокового смещения груза менее 0,27 м. Оптимальный диапазон давления рабочей жидкости пневмогидроаккумулятора составляет 35...50 МПа, при этом рекуперлируемая устройством мощность превышает 12,2 кВт, а амплитуда бокового смещения груза равняется не более 0,29 м.

4. По результатам 2-факторной оптимизации наилучшее плечо расположения верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,37...0,58 м, давление рабочей жидкости пневмогидравлического аккумулятора – 35...50 МПа. При этом предлагаемое пневмогидравлическое ре-

куперативное кониковое устройство с шаровой опорой генерирует мощность более 15 кВт, а амплитуда бокового смещения груженных лесоматериалов не превышает 0,2 м. Для поршневых пневмогидравлических аккумуляторов с максимальным давлением рабочей жидкости 35 МПа оптимальное плечо расположения верхних точек гидроцилиндров шаровой опоры коникового устройства составляет 0,5 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 279 с.

Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. *Planning an Experiment When Searching for Optimal Conditions*: 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).

2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

Granovskij V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data during Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. (Leningrad Branch), 1990. 288 p. (In Russ.).

3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 270 с.

Mudrov A.E. *Numerical Methods for Personal Computers in the Basic, Fortran and Pascal Languages*. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 270 p. (In Russ.).

4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 203 с.

Nikonov V.O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2021. 203 p. (In Russ.).

5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Матяшов А.Е. Перспективные конструкции кониковых устройств лесовозных автопоездов с шаровой опорой и демпферным механизмом // Инновационные технологии на автомобильном транспорте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 22–27.

Posmetev V.I., Nikonov V.O., Matyashov A.E. Prospective Designs of Conical Devices of Logging Road Trains with Ball Joint and Damper Mechanism. *Innovatsionnye tekhnologii na avtomobil'nom transporte* = Innovative Technologies in Motor Transport: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2024, pp. 22–27. (In Russ.).

[https://doi.org/10.58168/MOTOR2024\\_22-27](https://doi.org/10.58168/MOTOR2024_22-27)

6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В. Обоснование целесообразности оснащения лесовозных автопоездов рекуперативными тягово-сцепными устройствами по результатам имитационного моделирования. Воронеж: ВГЛТУ, 2023. 203 с.

Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. *Justification of the Feasibility of Equipping Timber Road Trains with Recuperative Towing Devices Based on the Results of Simulation Modeling*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2023. 203 p. (In Russ.).

7. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В. Повышение эффективности лесовозных автопоездов с помощью рекуперативных седельно-сцепных и поворотных кониковых устройств. Воронеж: ВГЛТУ, 2024. 282 с.

Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. *Improving the Efficiency of Timber Road Trains with Recuperative Fifth Wheel Couplings and Pivoting Cone Devices*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2024. 282 p. (In Russ.).

8. Allman M., Dudáková Z., Jankovský M., Merganič J. Operational Parameters of Logging Trucks Working in Mountainous Terrains of the Western Carpathians. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 6, art. no. 718. <https://doi.org/10.3390/f12060718>
9. Antilla P., Nummelin T., Väättäinen K., Laitila J., Ala-Ilomäki J., Kilpeläinen A. Effect of Vehicle Properties and Driving Environment on Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions of Timber Trucking Based on Data from Fleet Management System. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2022, vol. 15, art. no. 100671. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100671>
10. Brown M.W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight on Payload Efficiency: An Australian Case Study. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, art. no. 855. <https://doi.org/10.3390/f12070855>
11. Conrad IV J.L. Evaluating Profitability of Individual Timber Deliveries in the US South. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 4, art. no. 437. <https://doi.org/10.3390/f12040437>
12. Gao L., Wang D., Jin C., Yi T. Modelling and Performance Analysis of Cyclic Hydro-Pneumatic Energy Storage System Considering the Thermodynamic Characteristics. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 18, art. no. 6672. <https://doi.org/10.3390/en15186672>
13. Moskalik T., Tymendorf L., van der Saar J., Trzciński G. Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 16, art. no. 6028. <https://doi.org/10.3390/s22166028>
14. Muşat E.C., Abutnăriței G.L., Hogea D.D., Miu L.D., Avram V.N., Saicu S., Dercezi R.A. Loading Round Wood in Forestry Trucks and Forestry Platforms: A Case Study for Romania. *Forests*, 2024, vol. 15, no. 9, art. no. 1646. <https://doi.org/10.3390/f15091646>
15. Radzajewski P., Guzek M. Assessment of the Impact of Selected Parameters of Tractor-Semitrailer Set on the Braking Safety Indicators. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 9, art. no. 5336. <https://doi.org/10.3390/app13095336>
16. Salamah Y.B. Sliding Mode Controller for Autonomous Tractor-Trailer Vehicle Reverse Path Tracking. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 21, art. no. 11998. <https://doi.org/10.3390/app132111998>
17. Škvor P., Jankovský M., Natov P., Dvořák J., Zlatuška K. The Effect of Different Road Types on Timber Truck Drivers by Assessing the Load Environment of Drivers by Monitoring Changes in Muscle Tension. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 10, art. no. 1565. <https://doi.org/10.3390/f13101565>
18. Trzciński G., Tymendorf Ł. Multifactorial Analysis of the Axle Load of Truck Sets during the Transport of Sawmill By-Products. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 12, art. no. 1992. <https://doi.org/10.3390/f13121992>
19. Ziółkowski A., Fuć P., Lijewski P., Bednarek M., Jagielski A., Kusiak W., Igielka-Kalwat J. The Influence of the Type and Condition of Road Surfaces on the Exhaust Emissions and Fuel Consumption in the Transport of Timber. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 21, art. no. 7257. <https://doi.org/10.3390/en16217257>
20. Zuska A., Kurczyński D., Jackowski J.T. Study of Loads Acting on the Load during the Sudden Braking of a Vehicle. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 3, art. no. 1559. <https://doi.org/10.3390/app13031559>

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

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-161-173

## Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц при формировании в воде

**С.В. Посыпанов**<sup>1</sup>✉, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

**С.П. Карпачёв**<sup>2</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; [s.posypanov@narfu.ru](mailto:s.posypanov@narfu.ru)✉

<sup>2</sup>Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, ул. Бориса Галушкина, д. 4, Москва, Россия, 129366; [karpachevs@mail.ru](mailto:karpachevs@mail.ru)

---

*Поступила в редакцию 08.04.25 / Одобрена после рецензирования 20.06.25 / Принята к печати 21.06.25*

---

**Аннотация.** Перспективные технологии транспортировки круглых лесоматериалов из удаленных районов предусматривают после прохождения мелководных участков формирование из малогабаритных пакетов без нарушения их целостности двухъярусных пакетных сплоченных единиц. В предназначенных для этого устройствах предполагается выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц, осуществляемое с целью повышения их прочности и полнодревесности, что позволяет снизить затраты на буксировку по основной части маршрута. Цель исследования – получение формул для расчета сил, требуемых для выравнивания торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц, формируемых в воде; установление характера и степени влияния основных определяющих факторов на указанные силы. Метод исследования – теоретический. Получены аналитические формулы для расчета сил, требуемых при выравнивании торцов лесоматериалов в нижних и верхних пакетах двухъярусных пакетных сплоченных единиц. Определение величины  $a$ , входящей в указанные формулы, связано с вычислением интегралов, что в практических расчетах нежелательно. Доказано, что  $a$  зависит от коэффициента формы пакетов, от отношения их высоты к диаметру лесоматериалов и от яруса, в котором находятся пакеты. С использованием численных методов установлены значения  $a$  при различных сочетаниях определяющих факторов. По результатам вычислений для нормативных коэффициентов формы получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие вычислять при практических расчетах  $a$  и усилия торцевания для пакетов обоих ярусов. При проектировании устройств расчетное усилие выравнивания торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц складывается из соответствующих удвоенных усилий для верхних и нижних пакетов. Самым значимым фактором, влияющим на усилие выравнивания торцов лесоматериалов в пакете, является отношение его высоты к их диаметру. Увеличение этого отношения в исследованном диапазоне сопровождается возрастанием рассматриваемого усилия для пакетов обоих ярусов в 4,90–5,02 раза. Существенно на выходную величину влияет и коэффициент формы пакетов. Его рост от 1,5 до 2,5 вызывает уменьшение усилия выравнивания на 75–77 % у нижних пакетов и на 52–56 % у верхних. Связь усилия выравнивания с объемом пакета линейная прямая. Для выравнивания торцов лесоматериалов в пакетах верхнего яруса требуется большее усилие, чем в нижних.

**Ключевые слова:** лесосплав, круглые лесоматериалы, сплотовые единицы, выравнивание торцов лесоматериалов

**Для цитирования:** Посыпанов С.В., Карпачёв С.П. Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплотовых единиц при формировании в воде // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 161–173. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-161-173>

Original article

## Force Alignment of the Ends of Two-Tiered Package Rafting Units during their Formation in Water

*Sergey V. Posypanov*<sup>1</sup>, *Doctor of Engineering, Prof.;*

ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

*Sergey P. Karpachev*<sup>2</sup>, *Doctor of Engineering, Prof.;*

ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [s.posypanov@narfu.ru](mailto:s.posypanov@narfu.ru)

<sup>2</sup>The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, ul. Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366, Russian Federation; [karpachevs@mail.ru](mailto:karpachevs@mail.ru)

*Received on April 8, 2025 / Approved after reviewing on June 20, 2025 / Accepted on June 21, 2025*

**Abstract.** Promising technologies for transporting round timber from remote areas involve, after passing through shallow water areas, forming small-sized packages into two-tiered package units without violating their integrity. The devices designed for this purpose are intended to align the ends of two-tiered package rafting units, carried out in order to increase their strength and nontaperity, which allows for a reduction in towing costs along the main part of the route. The aim of the study has been to obtain formulas for calculating the forces required to align the ends of two-tiered package rafting units formed in water and to establish the nature and degree of influence of the main determining factors on these forces. The research method has been theoretical. Analytical formulas have been obtained for calculating the forces required for aligning the ends of logs in the lower and upper packages of two-tiered package rafting units. Determining the value of  $a$ , included in the given formulas, is associated with the calculation of integrals, which is undesirable in practical calculations. It has been proven that  $a$  depends on the shape coefficient of the packages, on the ratio of their height to the diameter of the logs and on the tier in which the packages are located. Using numerical methods, the values of  $a$  have been determined for various combinations of determining factors. Based on the calculation results for the standard shape coefficients, approximating dependencies have been obtained, which make it possible to establish, in practical calculations,  $a$  and the end-cutting forces for packages of both tiers. When designing devices, the calculated force for aligning the ends of two-tiered package rafting units consists of the corresponding double forces for the upper and lower packages. The most significant factor influencing the force of alignment of the ends of the logs in a package is the ratio of its height to their diameter. An increase in this ratio in the studied range is accompanied by an increase in the considered force for packages of both tiers by 4.90–5.02 times. The package shape coefficient also significantly influences the output value. Its increase from 1.5 to 2.5 causes a decrease in the alignment force by 75–77 % for the lower packages and by 52–56 % for the upper ones. The relationship

between the alignment force and the volume of the package is linear. To align the ends of logs in the upper tier packages, more force is required than in the lower ones.

**Keywords:** timber rafting, round timber, rafting units, alignment of log ends

**For citation:** Posypanov S.V., Karpachev S.P. Force Force Alignment of the Ends of Two-Tiered Package Rafting Units during their Formation in Water. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 161–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-161-173>

### *Введение*

Обеспечить экономическую доступность наиболее крупных запасов древесного сырья, находящихся преимущественно на большом удалении от потребителей, во многих случаях можно лишь при доставке его водным транспортом при рациональном использовании разветвленности речных сетей, обусловленной в основном малыми и средними водотоками. Такая доставка, в соответствии с концепцией, изложенной в работах [11, 12], может быть эффективно реализована с соблюдением действующих экологических требований. Согласно ее положениям, пакеты лесоматериалов малых размеров после прохождения мелководных участков с целью снижения затрат на дальнейшую буксировку по основной части маршрута сплавивают без нарушения их целостности в 4-пакетные двухъярусные единицы с использованием устройства [9], предусматривающего в процессе сплотки выравнивание торцов формируемых двухъярусных пакетных сплочных единиц (ДПСЕ) для повышения их прочности и полнодревесности [7], что также предполагает снижение удельных затрат. Указанное действие реализуется в рабочей камере устройства посредством надвигания на торцевую поверхность ДПСЕ одного из боковых щитов. Усилие, требуемое для выравнивания торцов ДПСЕ, является одним из основных параметров устройства. Установление этого параметра следует научно обосновать. Известные сведения по выравниванию торцов лесоматериалов представлены в [1–3, 5, 10, 13]. В них рассматриваются преимущественно лесоматериалы в отдельных пачках, пакетах и пучках, располагающихся на суше. При этом наличие стягивающих обвязок и влияние коэффициента формы сплочных единиц, как правило, не учитываются. Работ по выравниванию торцов ДПСЕ, имеющему существенные особенности, не обнаружено. Этот факт в совокупности с изложенной информацией позволил убедиться в необходимости проведения данного исследования.

Цель – получение формул для расчета сил, требуемых для выравнивания торцов ДПСЕ, формируемых в воде; установление характера и степени влияния основных определяющих факторов на указанные силы.

*Объект исследования* – формируемая в воде ДПСЕ. *Метод* – теоретический, базирующийся на положениях теорий сыпучей среды [14, 16, 19] и гибких нитей [6, 10].

### *Результаты исследования и их обсуждение*

В данном исследовании опирались на метод, использованный нами в статье [8] при обосновании усилия выравнивания торцов свободно плавающего пакета круглых лесоматериалов. В указанном источнике подробно изложена

суть метода и принятые допущения. Усилия, необходимые для выравнивания торцов пакетов в составе ДПСЕ, существенно отличаются от усилий для свободно плавающего пакета. Пакеты нижнего яруса находятся в полностью затопленном состоянии (рис. 1). Каждый нижний пакет представляется как гибкая оболочка, наполненная сыпучей средой одного вида. Контур поперечного сечения пакета рассматривается здесь как одна полная эллиптика. Ее размер определяет модулярная высота  $h_1$ , форму – модулярный угол  $\delta_1$  [6, 10].

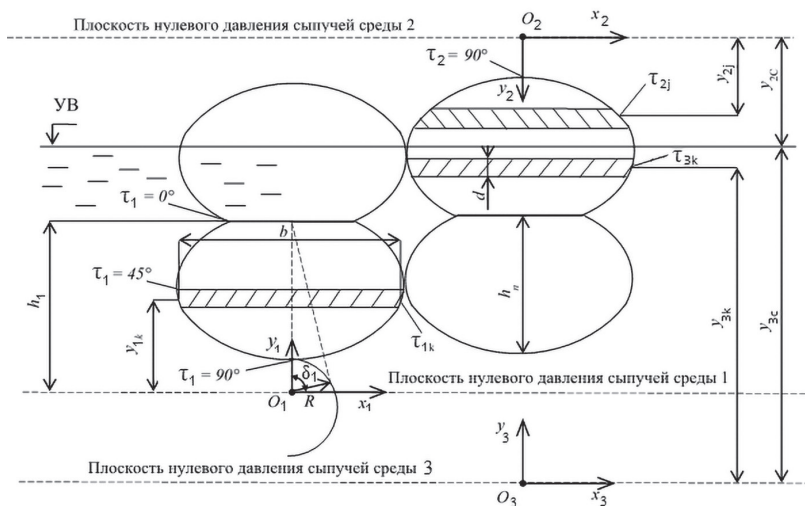


Рис. 1. Расчетная схема ДПСЕ, формируемой в воде. УВ – уровень воды  
Fig. 1. The design scheme of the 2-tiered package rafting unit formed in water.  
УВ is the water level

Линии, называемые эластками, описываются уравнениями [18]

$$x_i = \frac{1}{4} h_i \beta_i; \quad (1)$$

$$y_i = h_i \sigma_i, \quad (2)$$

где  $i$  – номер эластике и ее системы координат;  $x_i$  и  $y_i$  – координаты;  $\beta_i$ ,  $\sigma_i$  – параметры уравнений.

$$\beta_i = 2(2 - \sin^2 \delta_i) (W(\delta_i) - T(\delta_i, \tau_i)) - 4(J(\delta_i) - J(\delta_i, \tau_i)); \quad (3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{1 - \sin^2 \delta_i \sin^2 \tau_i}, \quad (4)$$

$\tau_i$  – параметр, изменяющийся по длине эластике, ...° [6, 10];  $W(\delta_i)$ ,  $J(\delta_i)$ ;  $T(\delta_i, \tau_i)$ ,  $J(\delta_i, \tau_i)$  – полные и неполные эллиптические интегралы 1-го и 2-го родов соответственно [15].

На сыпучую среду пакетов нижнего яруса действуют вертикальные силы тяжести и силы Архимеда, направленные в противоположные стороны. Нижние пакеты удерживаются от всплытия верхними. Сыпучая среда нижних пакетов сжимается. Среднее давление в ее слоях определяется по формуле

$$p_{v1} = (\rho_w - \rho_t) g \eta y_{1k}, \quad (5)$$

где  $\rho_w$ ,  $\rho_t$  – плотность воды и лесоматериалов соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – гравитационная постоянная,  $\text{м/с}^2$ ;  $\eta$  – коэффициент полнодревесности пакета лесоматериалов;  $y_{1k}$  – ордината оси  $k$ -го слоя в системе координат эластике под номером 1, м.

Для расчетных надводных слоев верхних пакетов формула будет иметь вид

$$P_{v2} = \rho_t g \eta y_{2j} . \quad (6)$$

При наличии вертикальных сил в сыпучей среде появляются и так называемые распорные горизонтальные усилия и соответствующие давления. Ниже уровня воды они определяются из выражения

$$P_{g1} = \lambda_a (\rho_w - \rho_t) g \eta y_{1k} ; \quad (7)$$

выше –

$$P_{g2} = \lambda_a \rho_t g \eta y_{2j} , \quad (8)$$

где  $\lambda_a$  – коэффициент активного распора [10].

Сила, препятствующая сдвигу лесоматериала в пакете в продольном направлении, определяется из формулы

$$F_t = 2f (P_v + P_g) , \quad (9)$$

где  $P_v$ ,  $P_g$  – вертикальные и горизонтальные силы сжатия соответственно, воспринимаемые лесоматериалом в пакете, Н;  $f$  – коэффициент трения.

Согласно выражениям, приведенным для вертикальных и горизонтальных давлений, они линейно зависят от ординат. Таким образом, силы сжатия можем определять по средним значениям соответствующих давлений на оси слоя. С учетом этого формулу (9) привели к виду

$$F_t = 2f (p_v dl + p_g dl) , \quad (10)$$

где  $d$ ,  $l$  – средний диаметр и длина лесоматериалов соответственно, м.

Приняв во внимание связь между (7) и (5), (8) и (6), преобразовали выражение (10):

$$F_t = 2p_v d l f (1 + \lambda_a) .$$

Сила, требуемая для выравнивания торцов лесоматериалов в слое пакета

$$F_s = 2n_t \alpha p_v d l f (1 + \lambda_a) , \quad (11)$$

где  $n_t$  – общее количество лесоматериалов в данном слое;  $\alpha$  – доля лесоматериалов, подлежащих выравниванию с одной из сторон пакета.

$$n_t = b / d , \quad (12)$$

где  $b$  – ширина оси слоя, м.

Преобразовали (11) с учетом (12):

$$F_s = 2b p_v \alpha l f (1 + \lambda_a) . \quad (13)$$

С учетом (5) для слоев, находящихся под водой, выражение (13) привели к виду

$$F_{sk} = 2b_k y_k (\rho_w - \rho_t) g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a) . \quad (14)$$

Для надводных слоев верхних пакетов формула с принятием во внимание (6) имеет вид

$$F_{sj} = 2b_j y_j \rho_t g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a) . \quad (15)$$

В формулах (14), (15) наряду с одинаковыми множителями есть и значительно отличающиеся. Для обозначения групп этих множителей использовали символ  $A$ . Для слоев, находящихся под водой,

$$A_i = b_i y_i (\rho_w - \rho_t) , \quad (16)$$

для надводных слоев

$$A_j = b_j y_j \rho_t. \quad (17)$$

Используя (16) и (17), привели выражения (14) и (15) к виду

$$F_{sk} = 2A_k g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a);$$

$$F_{sj} = 2A_j g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a).$$

Для определения усилия  $F$ , требуемого при выравнивании торцов пакета, необходимо просуммировать усилия по всем его слоям:

$$F = 2A_0 g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a), \quad (18)$$

где  $A_0$  – сумма величин  $A$  по всем слоям пакета, кг/м.

На этапе проектирования плотность лесоматериалов на лесосплаве принимают за  $800 \text{ кг/м}^3$ . С учетом этого в соответствии с (16), (17)  $A_0$  фактически является зависимой только от суммы произведений  $b$  и  $y$ , вычисленной для расчетного количества слоев пакета. Произведения  $b$  и  $y$  определяются формой его поперечного сечения, характеризуемой коэффициентом формы  $C$ , количеством слоев, т. е.  $h_n/d$ , а также площадью сечения  $\omega$ . При фиксированной  $\omega$ , равной 1,  $A_0$  зависит только от 1-х двух факторов.  $A_0$  при  $\omega = 1$  обозначили  $a$ . На основании изложенного можем утверждать, что  $a$  является функцией от  $C$  и  $h_n/d$ .

Используя полученные аналитические зависимости, выполнили расчет  $a$ , варьируя  $C$  и  $h_n/d$ . Пакеты в нижнем ярусе ДПСЕ в отличие от варианта, рассмотренного нами в статье [8], при аналогичных  $C$  и  $\omega = 1$  имеют другие  $h_n$ ,  $h$  и  $\delta$ . Их расчет и в данном случае осуществлен в соответствии с алгоритмом, описанным в [8], с помощью формул (1)–(4) с применением численных методов.

При каждом расчетном значении  $C$  задавали последовательно различное количество слоев. Делением высоты пакета на количество слоев вычисляли высоту слоя. Ординату оси нижнего слоя определяли вычитанием высоты пакета из модулярной высоты и прибавлением половины высоты слоя. Ордината каждого следующего слоя больше, чем у предыдущего на высоту слоя. Для всех осей путем деления их ординат на модулярные высоты вычисляли  $\sigma$ , согласно выражению (2), используя формулу

$$\tau = \arcsin \sqrt{\frac{1 - \sigma^2}{\sin^2 \delta}},$$

полученную в результате преобразования (4), вычисляли углы  $\tau$  для точек пересечения осей слоев и эластик. По  $\tau$  определяли  $\beta$  с помощью формулы (3). Интегралы, которые она содержит, вычисляли с использованием рядов [20]. Для указанных точек пересечения по формуле (1) определяли абсциссы. Умножив их на 2, вычисляли ширину оси каждого слоя. Далее находили произведения  $by$  и сумму этих произведений для всех слоев. В итоге  $a$  вычисляли умножением этой суммы на  $\rho_w - \rho_t$ .

При варьировании  $C$  придерживались интервала от 1,50 до 2,50 с шагом около 0,25. Величине  $h_n/d$  присваивали значения 4, 7, 10, 13, 17, 20. Диапазоны варьирования факторов назначены с учетом того, что ДПСЕ могут использоваться не только при реализации основной транспортно-технологической схемы. Их применение возможно также в схемах, не включающих этап первоначального сплава. При всех сочетаниях  $C$  и  $h_n/d$  вычислено 30 значений  $a$ . Основные величины по каждому расчету  $a$  приводили в отдельных таблицах. Одна из них представлена ниже (табл. 1).

Таблица 1

Основные величины по расчету  $a$  для нижних пакетов при  $C = 2,00$  и  $h_n/d = 10$   
 The main values in the calculations of  $a$  for the lower packages at  $C = 2.00$  and  $h_n/d = 10$

Слой	$y$ , м	$\sigma$	$\tau$ , ...°	$\beta$	$b$ , м	$b_y$ , м <sup>2</sup>
1	0,210	0,222	82,5	1,33	0,63	0,132
2	0,287	0,304	75,6	2,12	1,00	0,286
3	0,364	0,386	69,7	2,59	1,22	0,445
4	0,441	0,468	64,0	2,91	1,37	0,604
5	0,518	0,550	58,1	3,11	1,47	0,761
6	0,596	0,632	52,0	3,23	1,52	0,908
7	0,673	0,713	45,4	3,28	1,55	1,039
8	0,750	0,795	38,1	3,24	1,53	1,146
9	0,827	0,877	29,2	3,10	1,46	1,211
10	0,904	0,959	16,7	2,79	1,32	1,189
<i>Итого</i>						7,721

Умножив сумму произведений  $b_y$  7,721 м<sup>2</sup> на разницу указанных плотностей 1000–800 кг/м<sup>3</sup>, получили  $a = 1545$  кг/м. Результаты всех 30 расчетов  $a$  приведены в табл. 2.

Выполнили пересчет приведенных  $a$  на соответствующие нормативным величины  $C$ , указываемые в технических условиях. Используя их, построили графики (рис. 2).

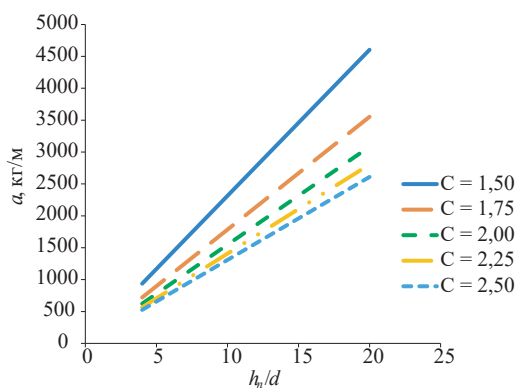
Таблица 2

Результаты расчетов  $a$  для нижних пакетов ДПСЕ  
 The results of the calculations of  $a$  for the lower packages  
 of the 2-tiered package rafting units

$C$	$a$ при $h_n/d$ , кг/м					
	4	7	10	13	17	20
2,57	521	908	1296	1683	2200	2587
2,31	554	965	1377	1788	2336	2748
2,00	623	1084	1545	2006	2620	3081
1,61	817	1417	2018	2619	3420	4021
1,42	1061	1838	2615	3392	4429	5206

Рис. 2. Зависимость  $a$  от  $h_n/d$   
 при различных  $C$  для нижних пакетов  
 ДПСЕ

Fig. 2. The dependence of  $a$  on  $h_n/d$   
 at different  $C$  for the lower packages  
 of the two-tiered package rafting units



Получили соответствующие аппроксимирующие выражения. Для  $C = 1,50$

$$a = 229 h_n/d + 20,5; \quad (19)$$

для  $C = 1,75$

$$a = 177 h_n/d + 12,2; \quad (20)$$

для  $C = 2,00$

$$a = 154 h_n/d + 8,5; \quad (21)$$

для  $C = 2,25$

$$a = 140 h_n/d + 6,2; \quad (22)$$

для  $C = 2,50$

$$a = 130 h_n/d + 4,8. \quad (23)$$

Достоверность аппроксимации для (19)–(23) выше 0,99 [17].

Обычно в расчетах принимают  $\alpha = 0,5$  [5, 10]. Для лесосплавных транспортных единиц коэффициент трения  $f$  берут за 0,2 [4, 10],  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Удвоенное произведение 3 этих величин, присутствующее в (18), равно 1,96. Для перехода от  $a$ , полученной для единичной площади поперечного сечения, к величине, соответствующей его фактической площади  $\omega$ , необходимо  $a$  умножить на  $\omega$ . Преобразовав формулу (18) с учетом изложенного, получили

$$F = 1,96l\omega\eta a(1 + \lambda_a). \quad (24)$$

Произведение  $l\omega\eta$  равно объему пакета  $V$ . То есть (24) можно привести к виду

$$F = 1,96Va(1 + \lambda_a). \quad (25)$$

Основными сплаваемыми породами являются ель и сосна, для первой  $\lambda_a$  рекомендуется принимать 0,361, для второй – 0,406.

В соответствии с (25) необходимое усилие при выравнивании торцов прямо пропорционально объему пакета, отношению его высоты к диаметру лесоматериалов (рис. 2) и коэффициенту  $\lambda_a$ . Из 3 перечисленных факторов  $h_n/d$  наиболее существенно влияет на результат. Его изменение от 4 до 20 приводит к увеличению рассматриваемого усилия в 4,90–4,97 раза. Зависимость усилия от коэффициента  $C$  наглядно демонстрируют графики (рис. 3). С уменьшением коэффициента в диапазоне 2,5–1,5 необходимое усилие для выравнивания торцов нижнего пакета увеличивается на 75–77 %.

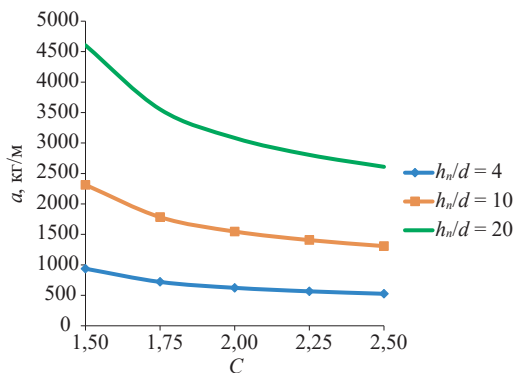


Рис. 3. Зависимость  $a$  от  $C$  при различных  $h_n/d$  для нижних пакетов ДПСЕ

Fig. 3. The dependence of  $a$  on  $C$  at different  $h_n/d$  for the lower packages of the two-tiered package rafting units

При рассмотрении верхних пакетов ДПСЕ имеем дело с сыпучей средой 2 видов. Один вид находится под водой, другой – над водой. Линии обвязок

верхних пакетов рассматриваются как комбинации фрагментов эластик 2 видов, которые сопрягаются на уровне водной поверхности. Таким образом, каждому коэффициенту  $C$  пакета соответствуют по 2 величины  $\delta$ ,  $h$  и  $\tau$ . Также для каждого  $C$  в системах  $x_2O_2y_2$  и  $x_3O_3y_3$  существуют  $y_{2C}$  и  $y_{3C}$ , связанные с точками соединения фрагментов.

На сыпучую среду выше поверхности воды действует сила тяжести. Сыпучая среда в подводной части верхних пакетов помимо силы тяжести воспринимает выталкивающую силу воды и усилия, передаваемые от нижних пакетов. Вертикальное сжатие пакетов в верхнем ярусе существенно больше. В соответствии с выражениями (7), (8) это можно сказать и о горизонтальных давлениях. Очевидно, что для выравнивания торцов верхних пакетов потребуется усилие больше, чем для нижних и для свободно плавающих [8].

Верхние пакеты ДПСЕ, как и нижние, при аналогичных коэффициентах  $C$  и единичной площади поперечного сечения отличаются от свободно плавающих по высоте, модулярным углам и высотам, форме сечения. Алгоритмы расчетов, выполняемых для верхних и свободно плавающих пакетов подобны [8].

В ходе расчетов для верхних пакетов придерживались тех же значений  $C$  и  $h_n/d$ , что и для нижних. Аналогично получили 30 значений  $a$ . Одна из 30 таблиц, заполняемых при расчетах  $a$ , приведена ниже (табл. 3).

Таблица 3

**Основные величины по расчету  $a$  для верхних пакетов при  $C = 2,00$  и  $h_n/d = 10$**   
**The main values in the calculations of  $a$  for the upper packages at  $C = 2.00$  and  $h_n/d = 10$**

Слой	$y$ , м	$\sigma$	$\tau$ , ...°	$\beta$	$b$ , м	$by$ , м <sup>2</sup>
<i>Подводные слои</i>						
1	1,203	0,682	77,0	0,369	1,181	1,421
2	1,278	0,724	66,7	0,602	1,387	1,773
3	1,353	0,767	58,7	0,724	1,495	2,023
4	1,429	0,810	51,4	0,787	1,550	2,214
5	1,504	0,853	44,1	0,803	1,565	2,353
6	1,579	0,895	36,4	0,775	1,540	2,431
<i>Всего</i>						12,215
<i>Надводные слои</i>						
7	0,322	0,484	61,4	4,426	1,469	0,472
8	0,246	0,371	68,8	4,039	1,341	0,330
9	0,171	0,257	75,9	3,402	1,129	0,193
10	0,096	0,144	83,4	2,351	0,780	0,075
<i>Всего</i>						1,070

Умножив сумму произведений  $b$  и  $y$  по подводным слоям 12,215 м<sup>2</sup> на разницу плотностей 1000–800 кг/м<sup>3</sup>, получили 2443 кг/м. Аналогично, умножив сумму произведений  $b$  и  $y$  по надводным слоям 1,070 м<sup>2</sup> на плотность лесоматериалов 800 кг/м<sup>3</sup>, получили и 856 кг/м. Просуммировав 2443 и 856 установили  $a = 3299$  кг/м для данного случая. Результаты всех 30 расчетов  $a$  для верхних пакетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты расчетов  $a$  для верхних пакетов ДПСЕ**  
**The results of the calculations of  $a$  for the upper packages**  
**of the two-tiered package rafting units**

$C$	$a$ при $h_n/d$ , кг/м					
	4	7	10	13	17	20
2,57	1153	2006	2874	3722	4870	5722
2,31	1212	2108	2930	3910	5115	6010
2,00	1326	2304	3299	4271	5587	6567
1,61	1645	2850	4075	5278	6901	8109
1,42	1915	3399	4893	6209	8086	9579

Как и для нижних пакетов выполнили пересчет  $a$  на нормативные  $C$ . При различии количественных показателей характер полученных зависимостей  $a$  от  $h_n/d$  и  $C$  для верхних пакетов аналогичен приведенным на рис. 2 и 3. Аппроксимирующие выражения для верхних пакетов имеют вид в случае  $C = 1,50$

$$a = 441,4 h_n/d + 37,7; \quad (26)$$

для  $C = 1,75$

$$a = 369,5 h_n/d + 22,1; \quad (27)$$

для  $C = 2,00$

$$a = 328,0 h_n/d + 14,2; \quad (28)$$

для  $C = 2,25$

$$a = 305,1 h_n/d - 9,3; \quad (29)$$

для  $C = 2,50$

$$a = 290,1 h_n/d - 8,6. \quad (30)$$

Достоверность аппроксимации и этих выражений не менее 0,99.

И в данном случае фактор  $h_n/d$  наиболее существенно влияет на результат. Изменение этого фактора от 4 до 20 приводит к увеличению усилия торцевания в 4,92–5,02 раза. Здесь по сравнению с нижними пакетами уменьшается влияние коэффициента  $C$ , оставаясь довольно существенным. С понижением коэффициента от 2,5 до 1,5 усилие для выравнивания торцов растет на 52–56 %.

Наличие эмпирических выражений (19)–(23) для нижних пакетов и (26)–(30) для верхних позволяет с помощью формулы (24) или (25) вычислять усилие для выравнивания торцов.

Выравнивание торцов ДПСЕ может сопровождаться сдвигом не только лесоматериалов в пакетах. Пакеты в целом также могут сдвигаться. Наиболее существенное взаимодействие при этом будет наблюдаться между пакетами разных ярусов. Верхний пакет препятствует всплытию нижнего и при этом воспринимает от него усилие

$$G_k = Vg(\rho_w - \rho_t).$$

При этом сдвигу пакета препятствует сила

$$F_n = Vgf(\rho_w - \rho_t). \quad (31)$$

Значения  $g, f, \rho_w, \rho_t$  приняли такими же, что и при выводе (25). В результате из (31) получили

$$F_n = 392V. \quad (32)$$

Используя (25) и (32), установили, что  $F_n$  может превысить усилие выравнивания торцов лесоматериалов в пакете при  $a$ , меньшей чем 142 кг/м. Величины  $a$ , представленные в табл. 2 и 4, значительно больше этого показателя. То есть при проектировании  $F_n$  не является расчетной величиной.

Поскольку ДПСЕ состоит из 4 пакетов, для определения усилия, необходимого для выравнивания ее торцов, следует сложить усилия для нижних и верхних пакетов и удвоить полученную сумму.

#### *Заключение*

Используя теории гибких нитей и сыпучей среды, получили аналитические формулы для определения расчетных усилий выравнивания торцов лесоматериалов в нижних и верхних пакетах формируемой в воде двухъярусной пакетной сплочной единицы.

Установили, что величина  $a$ , входящая в указанные формулы, зависит от коэффициента формы пакетов, от отношения их высоты к диаметру лесоматериалов и от яруса, в котором находятся пакеты. Определение  $a$  в каждом случае аналитическим путем связано с вычислением интегралов, что нежелательно при практических расчетах.

Используя численные методы, для пакетов двухъярусной сплочной единицы, формируемой в воде, определили  $a$  при различных сочетаниях указанных определяющих факторов. По результатам вычислений для нормативных коэффициентов формы получили аппроксимирующие зависимости, позволяющие устанавливать  $a$  для пакетов нижнего и верхнего ярусов. Наличие этих зависимостей позволяет находить требуемые усилия выравнивания торцов с помощью аналитических формул.

Выявили, что силы, необходимые для продольного перемещения отдельных пакетов в составе двухъярусной пакетной сплочной единицы, находящейся в воде, всегда существенно меньше сил, прикладываемых при выравнивании торцов лесоматериалов в пакетах. То есть при проектировании устройств силы первого вида не относятся к расчетным. Для определения усилия для выравнивания торцов двухъярусной пакетной сплочной единицы следует сложить усилия для нижних и верхних пакетов и удвоить полученную величину.

Самым значимым фактором, влияющим на усилие выравнивания торцов лесоматериалов в пакете, является отношение его высоты к их диаметру. Увеличение этого отношения в исследованном диапазоне сопровождается возрастанием усилия для пакетов обоих ярусов в 4,90–5,02 раза. Существенно на выходную величину влияет и коэффициент формы. Его увеличение от 1,5 до 2,5 вызывает уменьшение усилия выравнивания на 75–77 % у нижних пакетов и на 52–56 % – у верхних. Связь усилия выравнивания с объемом пакета линейная прямая. Для выравнивания торцов лесоматериалов в пакетах верхнего яруса требуется большее усилие, чем в нижних.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Войтко П.Ф.* Методика и результаты производственных испытаний передвижных и переносных торцевывравнивателей на рейдах приплава лесопромышленных предприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. № 5. С. 69–77.

Vojtko P.F. Technique and Results of Production Testing of Mobile and Portable Butt Edgers in Log Receiving Ports of Forest-Industrial Enterprises. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2004, no. 5, pp. 69–77. (In Russ.).

2. Войтко П.Ф. Совершенствование процессов выгрузки лесоматериалов с воды и их торцевание на рейдах приплава: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Йошкар-Ола, 2005. 39 с.

Vojtko P.F. *Improving the Processes of Unloading Timber from Water and Cross-Cutting It at the Log Receiving Ports*: Doc. Tech. Sci. Diss. Abs. Yoshkar-Ola, 2005. 39 p. (In Russ.).

3. Войтко П.Ф., Фадеев А.С. Математические модели формирования лесных грузов гравитационными торцевывравнивателями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 57–65.

Vojtko P.F., Fadeev A.S. Mathematical Models of Forest Cargo Formation by Gravitational Trimmers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 4, pp. 57–65. (In Russ.).

4. Грубов С.М. Экспериментальное и теоретическое определение некоторых статистических коэффициентов сопротивления перемещению неокоренной древесины. М.: ЦНИИМЭ, 1971. 118 с.

Grubov S.M. *Experimental and Theoretical Determination of Some Statistical Coefficients of Resistance to Displacement of Unbarked Wood*. Moscow, Central Research and Design Institute of Mechanization and Power Engineering of the Forest Industry, 1971. 118 p. (In Russ.).

5. Донской И.П., Виноградов Я.И. Усилия выравнивания торцов пакетов бревен // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1974. Вып. 111. С. 13–17.

Donskoj I.P., Vinogradov Ya.I. Forces to Align the Ends of Log Bundles. *Lesosechnye, lesoskladskie raboty i transport lesa*: Interuniversity Collection of Scientific Papers. Leningrad, Forest Engineering Academy Publ., 1974, iss. 111, pp. 13–17. (In Russ.).

6. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.

Merkin D.R. *Introduction to Flexible Filament Mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 240 p. (In Russ.).

7. Патыкин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.

Patyakin V.I., Dmitriev Yu.Ya., Zajtsev A.A. *Water Transport of Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 336 p. (In Russ.).

8. Песков И.А., Посыпанов С.В. Обоснование усилий, необходимых при торцевании плавающих пакетных сплоченных единиц // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2021. Вып. 235. С. 165–178.

Peskov I.A., Posypanov S.V. Justification of the Forces Required for Leveling Ends of Floating Packaged Rafting Units. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 165–178. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.165-178>

9. Посыпанов С.В., Песков И.А. Технология навигационной сплотки двухъярусных пакетных лесотранспортных единиц // Аллея Науки: науч.-практ. электрон. журн. 2018. № 5-8(21). С. 73–75.

Posypanov S.V., Peskov I.A. Technology of Navigation Rafting of 2-Tier Timber Transport Units. *Alleya Nauki. Scientific and Practical Electronic Journal*, 2018, no. 5-8(21), pp. 73–75. (In Russ.).

10. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с.

Reutov Yu.M. *Calculations of Bundles (Packages) of Round Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 152 p. (In Russ.).

11. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–52.

Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2007, no. 1, pp. 45–52. (In Russ.).

12. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Ресурсы отдаленных лесных массивов и возможность их освоения сплавом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 30–36.

Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Resources of Remote Forestland and Possibility of Their Development by Rafting. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2008, no. 2, pp. 30–36. (In Russ.).

13. Фадеев А.С. Обоснование параметров гравитационного торцевывравнивателя с поворотными щитами для формирования пачек круглых лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 1999. 249 с.

Fadeev A.S. *Justification of the Parameters of a Gravity End Leveler with Rotary Shields for Forming Bundles of Round Timber*: Cand. Tech. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 1999. 249 p. (In Russ.).

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Soil Mechanics*: 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

15. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists*: 2nd ed., revised. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1971, vol. 67. 360 p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-65138-0>

16. Craig R.F. *Soil Mechanics*: 6th ed. London, New York, E. & F.N. Spon, 1997. 485 p.

17. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*: 3rd ed. London, SAGE Publications Ltd., 2009. 856 p.

18. Tölke F. *Parameterfunktionen. Theta-Funktionen und spezielle Weierstraßsche Funktionen. Praktische Funktionenlehre*: vol. 2. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1966, pp. 83–115. (In Germ.). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-51616-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-51616-0_3)

19. Verruijt A. *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, 2012. 331 p.

20. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course of Modern Analysis*: 4th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. 620 p.

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

Научная статья

УДК 674.028.9+674.049.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-174-189

## Точность формирования прямоугольных шипов способом торцевого прессования без базирующей оснастки

**Я.Д. Ведерников**<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [NYT-2403-2025](https://orcid.org/0009-0002-6839-5152),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6839-5152>

**О.А. Рублева**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [Q-7239-2017](https://orcid.org/0000-0003-0756-6130),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0756-6130>

**Е.С. Васильева**<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [NZN-4596-2025](https://orcid.org/0009-0004-7664-0538),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7664-0538>

**Е.Е. Шишкина**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6021-2018](https://orcid.org/0000-0002-2584-4897),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

**А.Г. Гороховский**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](https://orcid.org/0000-0001-8847-8217),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>

<sup>1</sup>Вятский государственный университет, ул. Московская, д. 36, г. Киров, Россия, 610000; [vedernikov@vyatsu.ru](mailto:vedernikov@vyatsu.ru), [rubleva@vyatsu.ru](mailto:rubleva@vyatsu.ru), [es\\_vasilieva@vyatsu.ru](mailto:es_vasilieva@vyatsu.ru)

<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; [elenashishkina@yandex.ru](mailto:elenashishkina@yandex.ru), [goralegr@yandex.ru](mailto:goralegr@yandex.ru)

---

Поступила в редакцию 19.08.25 / Одобрена после рецензирования 29.10.25 / Принята к печати 31.10.25

---

**Аннотация.** Представлен анализ экспериментальных данных по определению точности изготовления элементов шиповых соединений в заготовках из сосны, полученных способом торцевого прессования без применения базирующе-обжимной оснастки. В качестве формообразующего инструмента использовался специализированный пуансон из стали 45 с геометрическими параметрами: толщина шипов – 2,2 мм, ширина проушин – 2,0 мм, высота – 10 мм. Прессование выполнялось на гидравлическом прессе с усилием от 800 до 1100 кгс и скоростью от 1,5 до 2 мм/с. Цель исследования – экспериментальная оценка точности формирования прямоугольных шипов, полученных холодным торцевым прессованием, для определения ее соответствия требованиям, предъявляемым к заготовкам для последующего сращивания по длине. Измерены толщины шипов и ширины проушин на 18 заготовках. Шипы и проушины условно подразделили на 2 группы: находящиеся в крайних зонах ближе к боковым кромкам заготовки и находящиеся в центральной зоне. Для оценки влияния расположения элементов относительно кромок на отклонение их размеров проведен 1-факторный дисперсионный анализ (ANOVA) в MS Excel. Определено, что точность ширины проушин и толщины шипов соответствует 11–12 квалитетам, однако крайние правые элементы имеют отклонения до 14 квалитетов. Положение проушин относительно кромки заготовки статистически значимо воздействует на точность, тогда как для шипов данная гипотеза не подтвердилась. Спрогнозирована точность формирования шипов торцевым прессованием: 95 % элементов шипового соединения будут соответствовать полям допусков JS13 для проушин и js13 для шипов. Для повышения точности изготовления элементов шипового соединения необходимо внедрение обжимной оснастки для компенсации перекосов и отжима крайних шипов, а также коррекция базирования заготовок направляющими элементами оснастки.

---

© Ведерников Я.Д., Рублева О.А., Васильева Е.С., Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г., 2026



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

**Ключевые слова:** древесина сосны, шиповое соединение, холодное торцовое прессование, точность обработки, дисперсионный анализ, качества точности, штамповая оснастка

**Для цитирования:** Ведерников Я.Д., Рублева О.А., Васильева Е.С., Шишкина Е.Е., Гороховский А.Г. Точность формирования прямоугольных шипов способом торцового прессования без базирующей оснастки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 174–189. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-174-189>

Original article

## The Accuracy of Forming Rectangular Tenons by End-Pressing without Guiding Tooling

**Yaroslav D. Vedernikov**<sup>1</sup>✉, Postgraduate Student; ResearcherID: [NYT-2403-2025](https://orcid.org/0009-0002-6839-5152),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6839-5152>

**Olga A. Rubleva**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Q-7239-2017](https://orcid.org/0000-0003-0756-6130), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0756-6130>

**Elizaveta S. Vasilyeva**<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [NZN-4596-2025](https://orcid.org/0009-0004-7664-0538),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7664-0538>

**Elena E. Shishkina**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6021-2018](https://orcid.org/0000-0002-2584-4897),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2584-4897>

**Alexandr G. Gorokhovskiy**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6030-2018](https://orcid.org/0000-0001-8847-8217),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>

<sup>1</sup>Vyatka State University, Moskovskaya st, 36, Kirov, 610000, Russian Federation; [vedernikov@vyatsu.ru](mailto:vedernikov@vyatsu.ru)✉, [rubleva@vyatsu.ru](mailto:rubleva@vyatsu.ru), [es\\_vasilieva@vyatsu.ru](mailto:es_vasilieva@vyatsu.ru)

<sup>2</sup>Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; [elenashishkina@yandex.ru](mailto:elenashishkina@yandex.ru), [goralegr@yandex.ru](mailto:goralegr@yandex.ru)

---

Received on August 19, 2025 / Approved after reviewing on October 29, 2025 / Accepted on October 31, 2025

---

**Abstract.** The article presents an analysis of experimental data on the manufacturing accuracy of tenon joint elements in pine workpieces produced by end pressing without using locating-clamping tooling. A specialized punch made of 45 steel was used as a forming tool, its geometric parameters are following: tenon thickness – 2.2 mm, mortise width – 2.0 mm, and height – 10 mm. Pressing was performed on a hydraulic press with a force ranging from 800 to 1100 kgf and a speed of 1.5 to 2 mm/s. The study aimed to experimentally evaluate the forming accuracy of rectangular tenons produced by cold end pressing to determine their compliance with requirements for workpieces intended for subsequent lengthwise splicing. Tenon thicknesses and mortise widths were measured on 18 workpieces. The tenons and mortises were conditionally divided into 2 groups: those located in edge zones closer to the workpiece side edges and those in the central zone. A one-way ANOVA in MS Excel was conducted to assess the influence of element position relative to edges on dimensional deviations. Results showed that mortise width and tenon thickness accuracy corresponded to IT11–12 grades, though edge elements on the right side exhibited deviations up to IT14. The position of mortises relative to workpiece edges had statistically significant effects on accuracy, while this hypothesis was not confirmed for tenons. The achievable accuracy for end-pressed tenon forming was predicted: 95 % of joint elements would comply with JS13 tolerance fields for mortises

and js13 – for tenons. To improve forming accuracy, implementing clamping tooling to compensate for skewing and edge tenon springback is recommended, along with workpiece positioning correction using guide elements in the tooling.

**Keywords:** pine wood, tenon joint, cold end pressing, machining accuracy, ANOVA (analysis of variance), IT accuracy grades, stamping tooling

**For citation:** Vedernikov Ya.D., Rubleva O.A., Vasilyeva E.S., Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.G. The Accuracy of Forming Rectangular Tenons by End-Pressing without Guiding Tooling. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 174–189. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-174-189>

### *Введение*

Клееная продукция из короткомерных отходов лесопиления является распространенной заменой массивной древесины в производстве столярных изделий и различных деревянных конструкций. Наиболее часто встречающимися клеевыми соединениями являются соединения заготовок по длине при помощи зубчатых торцовых шипов, полученных фрезерованием [1, 2, 5, 6, 8, 32].

Фрезерованные зубчатые шипы обладают рядом положительных характеристик, таких как экономия материала при фрезеровании и скорость формирования шипов. Однако при этом есть и отрицательные аспекты: высокие сложность и стоимость оборудования и инструмента, необходимость в удалении стружки, несовершенная геометрия шипа, влияющая на прочность соединения (наличие перерезанных волокон на боковых поверхностях и скруглений в вершинах и основаниях шипов) [16, 19, 27, 29, 36, 38–40].

Авторами [10, 14, 15] предложен способ формирования шипов на торцах деревянных заготовок принципиально новым способом – прессованием. Суть способа заключается в формировании шипов прямоугольной формы путем введения в торец заготовки стального пуансона. Профиль пуансона зеркально отражает форму создаваемых элементов – шипов и проушин заготовки.

Эффективное промышленное применение данного метода требует проведения исследований на соответствие получаемых соединений стандартам качества. Качественные характеристики соединений и параметры оценки изделий определяются нормативной базой, включающей в себя межгосударственные и отраслевые стандарты: ГОСТ 15613.4–78, ГОСТ 15613.5–79, ГОСТ 4.223–83, ГОСТ 475–2016, ГОСТ 16483.23–73, ГОСТ 16483.3–84, ГОСТ 16588–91, ГОСТ 19414–90, СП 64.13330.2017, а также технические условия серии СТО 36554501. Основными контролируемыми параметрами являются: геометрическая точность формируемых элементов, прочность изготовленных деталей и клеевого соединения, допустимые зазоры и натяги, а также характеристики клеевого шва, при этом прочность клеевого соединения является важнейшим показателем [5, 16, 20, 21, 24, 29, 33, 35, 38].

Существенное влияние на надежность шипового клеевого соединения оказывают размеры и точность геометрических параметров элементов, обеспечивающие требуемую величину и равномерность зазоров между ответными элементами соединяемых деталей и, как следствие, равномерность распределения клея и нужную толщину клеевого шва [9, 16, 25, 26, 28, 31, 37].

Требования к геометрическим параметрам элементов, участвующих в шиповом соединении, рассматриваются в работах [12, 13, 16, 22–24, 27, 30, 33]. К таким параметрам авторы [7, 16, 26, 31, 34] относят: размеры шипов, посадки, длину клевого шва, расположение шва относительно направления волокон древесины.

При формировании элементов шипового соединения методом торцового прессования существует риск снижения точности профилей изготавливаемых шипов при отсутствии должного базирования и обжима заготовок [3, 4, 11, 13, 14]. В указанных источниках установлено, что требования к технологической оснастке для способа формирования шипов прессованием недостаточно проработаны. Вместе с тем перечислены направления исследований по поиску вариантов конструкций такой оснастки и обеспечения ее точности. Для выполнения данных исследований необходимо прогнозировать получаемую точность шиповых элементов.

Определение критериев точности формирования шипов ранее проводилось в ходе исследований [7, 17]. Изучали 2 типоразмера шипов: толщина шипов – 2 мм, ширина проушин – 2,2 мм, глубина проушин (высота шипов) – 10 мм и толщина шипов – 4 мм, ширина проушин – 4,2 мм, глубина – 20 мм. Выявлено влияние посадки и точности изготовления заготовки на прочность как результирующий показатель качества. По итогам научных изысканий [7, 16, 17] были предложены теоретические параметры посадок для малых толщин шипов до 3 мм.

Актуальность работы обусловлена необходимостью продолжения исследований в области оценки точности геометрических параметров шипов и ее соответствия данным, полученным при исследованиях оптимальных расчетных зазора и натяга [7, 16, 17].

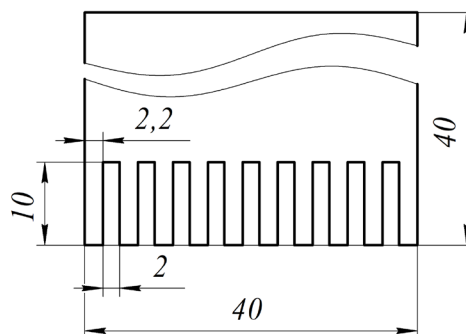
#### *Объекты и методы исследования*

В качестве заготовок использовались бруски из сосны обыкновенной с толщиной, шириной и длиной 20, 40 и 160 мм соответственно. Средняя влажность заготовок, измеренная с помощью влагомера Bosch Universal Humid, составила 8–10 %. Ориентация волокон – вдоль длины заготовки. Общее количество заготовок – 18.

Формирование шипов на торцах заготовок осуществлялось при помощи пуансона из стали 45 твердостью 45 HRC. Параметры рабочей части пуансона: толщина шипов – 2,2 мм, ширина проушин – 2,0 мм, высота шипов – 10 мм (рис. 1).

Рис. 1. Геометрические параметры пуансона

Fig. 1. Punch geometry dimensions



Прессование шипов осуществлялось на гидравлическом прессе П6324, усилие прессования – от 800 до 1100 кгс, скорость прессования – от 1,5 до 2 мм/с. При этом относительная влажность воздуха составила  $65 \pm 15\%$ , температура воздуха –  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

У пуансона и каждой заготовки была обозначена лицевая сторона, по ней слева направо проводилась нумерация шипов. Заготовка устанавливалась вертикально на стол пресса, базируясь на нижнем торце. На верхнем торце заготовки располагали пуансон таким образом, чтобы его боковые стороны были заподлицо с боковыми сторонами заготовки (рис. 2, а). Затем осуществлялось внедрение пуансона в заготовку (рис. 2, б). Затем осуществлялось внедрение пуансона в заготовку (рис. 2, в).

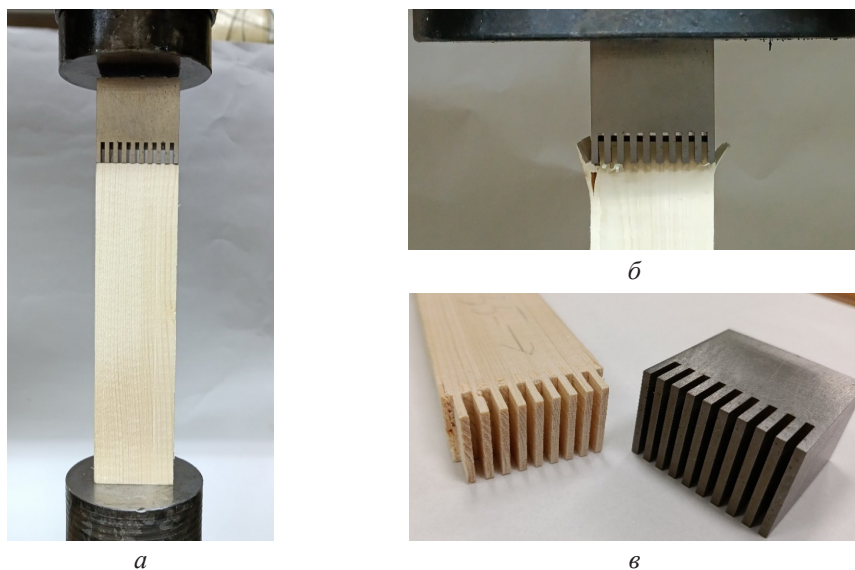


Рис. 2. Процесс и результат формирования шипов: а – заготовка и пуансон на столе пресса; б – внедрение пуансона в заготовку; в – внешний вид пуансона и прессованной заготовки

Fig. 2. The process and the result of the formation of tenons: а – initial setup with punch and workpiece; б – punch engagement phase; в – final punch and workpiece geometries

Сформированные в заготовках шипы и проушины условно подразделили на 2 группы (рис. 3): расположенные в крайних зонах (ближе к боковым краям заготовки) № 1–9 и расположенные в центральной зоне № 2–8.



Рис. 3. Нумерация и обозначение шипов и проушин на детали

Fig. 3. Numbering and marking of spikes and lugs on the part

Измерение толщины шипов и ширины проушин проводилось на инструментальном микроскопе ИМЦЛ 150×75 с погрешностью измерения  $\pm 0,003$  мм.

При определении прогнозируемых толщин шипов и ширин проушин полученные средние значения анализировали, соотнося их с допусками размеров, прописанными в ГОСТ 6449.1–82 и ГОСТ 25346–89.

Влияние расположения шипов и проушин относительно кромки детали на отклонения их ширины оценивалось в прикладном пакете MS Excel с использованием статистических методов, включающих 1-факторный дисперсионный анализ (ANOVA).

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Результаты измерения толщин шипов и ширин проушин приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

#### **Результаты измерения толщин шипов, мм Tenon thickness measurement results, mm**

Деталь	Шип 1	Шип 2	Шип 3	Шип 4	Шип 5	Шип 6	Шип 7	Шип 8	Шип 9
1	2,036	1,980	1,972	1,979	2,065	2,100	1,959	1,998	1,954
2	1,825	1,959	1,979	2,049	1,934	2,006	1,880	1,996	1,948
2	1,896	1,961	1,962	1,914	1,963	1,983	1,921	1,978	1,722
4	1,853	1,917	1,969	1,927	1,881	1,883	1,859	1,895	1,842
5	1,980	2,046	1,966	1,999	2,006	1,901	2,061	2,021	2,027
6	2,079	2,061	1,980	1,999	2,094	2,029	2,077	2,102	2,056
7	2,114	1,946	2,177	1,973	2,031	2,121	2,110	2,084	2,087
8	2,002	2,046	2,022	2,024	2,047	1,999	2,002	1,979	2,124
9	1,975	1,987	2,033	2,028	2,087	2,234	2,080	2,000	1,992
10	1,997	2,046	1,953	2,117	2,025	1,995	2,105	2,033	1,999
11	1,932	2,009	2,002	1,882	1,915	1,945	1,945	1,958	1,856
12	2,006	2,100	2,031	2,088	2,096	2,063	2,039	1,984	1,999
13	2,065	2,055	2,071	2,005	2,029	2,099	2,023	2,093	2,152
14	2,010	1,918	1,908	1,942	1,872	1,944	2,055	1,976	1,963
15	1,979	1,946	1,935	2,044	1,956	1,959	1,950	1,957	1,922
16	2,050	2,110	2,071	2,125	1,994	1,999	1,998	1,948	1,995
17	2,009	2,030	2,049	1,955	1,945	1,940	1,965	1,998	1,911
18	1,942	1,994	1,948	2,036	2,010	2,039	2,048	1,949	1,939

Таблица 2

#### **Результаты измерения ширин проушин, мм Mortise width measurement results, mm**

Деталь	Проушина 1	Проушина 2	Проушина 3	Проушина 4	Проушина 5	Проушина 6	Проушина 7	Проушина 8
1	2,217	2,189	2,229	2,150	2,168	2,204	2,280	2,589
2	2,324	2,310	2,132	2,171	2,217	2,198	2,267	2,242
2	2,241	2,291	2,279	2,303	2,264	2,308	2,321	2,725
4	2,301	2,237	2,214	2,340	2,380	2,357	2,351	2,507
5	2,212	2,199	2,223	2,183	2,266	2,169	2,239	2,221
6	2,194	2,162	2,225	2,127	2,187	2,117	2,108	2,190
7	2,279	2,157	2,030	2,228	2,094	2,135	2,019	2,139

Окончание табл. 2

Деталь	Проушина 1	Проушина 2	Проушина 3	Проушина 4	Проушина 5	Проушина 6	Проушина 7	Проушина 8
8	2,210	2,200	2,186	2,234	2,175	2,228	2,233	2,149
9	2,269	2,127	2,201	2,076	2,234	1,941	2,158	2,437
10	2,181	2,263	2,099	2,089	2,233	2,129	2,174	2,317
11	2,288	2,219	2,287	2,333	2,266	2,256	2,299	2,466
12	2,201	2,215	2,102	2,148	2,120	2,174	2,169	2,315
13	2,167	2,143	2,124	2,204	2,134	2,213	2,058	2,239
14	2,406	2,266	2,229	2,322	2,302	2,114	2,192	2,376
15	2,216	2,403	2,227	2,192	2,300	2,306	2,243	2,360
16	2,307	2,090	2,211	2,114	2,229	2,162	2,241	2,316
17	2,224	2,282	2,123	2,259	2,290	2,250	2,186	2,401
18	2,278	2,264	2,173	2,170	2,171	2,168	2,205	2,313

Влияние зоны расположения шипов и проушин на отклонения их размеров. Полученные в среде MS Excel диаграммы размаха приведены на рис. 4, 5.

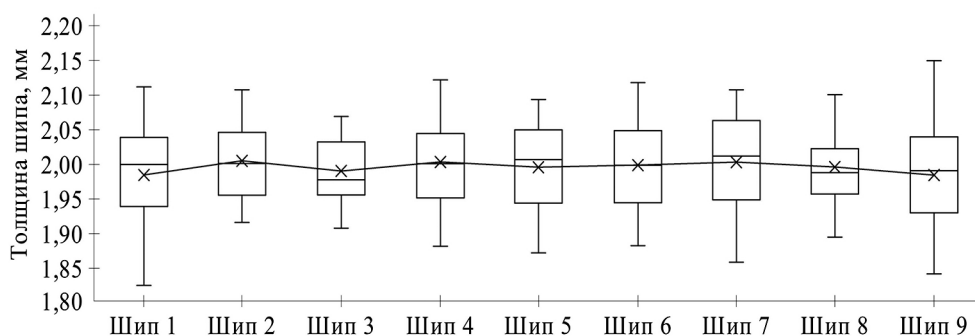


Рис. 4. Диаграмма размаха толщин шипов

Fig. 4. Box plot of tenon thickness distribution

По диаграмме размаха толщин шипов можно сделать следующие выводы: средние толщины шипов отклоняются от номинальной ширины 2 мм не более чем на 0,05 мм; 75 % всех толщин находятся в пределах от 1,92 до 2,07 мм; разброс размеров крайних шипов № 1 и 9 заметно больше, чем у центральных.

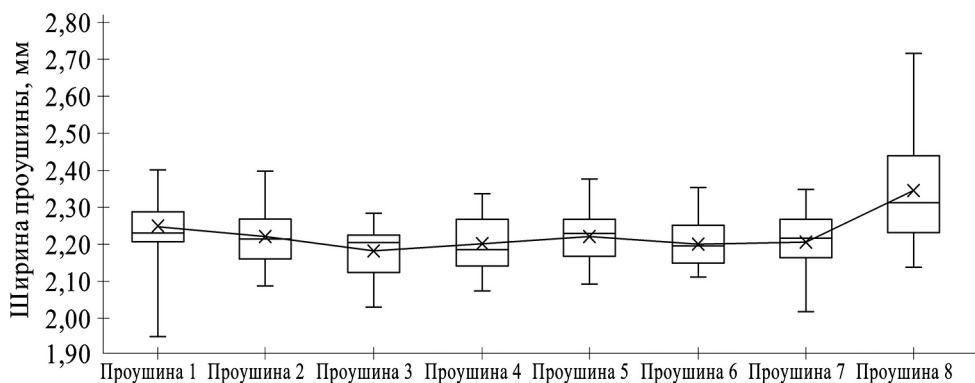


Рис. 5. Диаграмма размаха ширин проушин

Fig. 5. Box plot of mortise width distribution

По диаграмме размаха ширин проушин можно сказать, что средние ширины проушин отклоняются от номинальной ширины 2,2 мм не более чем на 0,15 мм; 75 % всех ширин находятся в пределах от 2,12 до 2,3 мм за исключением проушины № 8, у которой верхняя граница составляет 2,7 мм; разброс размеров проушин № 7 и 8 заметно больше, чем у остальных.

1-факторный дисперсионный анализ проводился с выдвигением нулевой гипотезы о том, что местоположение шипа или проушины относительно кромки заготовки не влияет на его точность. При этом, для исключения воздействия повторяемости крайних шипов из-за симметричности детали анализ был проведен отдельно для левой и правой половин детали относительно оси симметрии. Ниже представлены результаты 1-факторного дисперсионного анализа толщин шипов на левой и правой половинах детали (рис. 6).

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Шип 1	18	35,75	1,986	0,0056776		
Шип 2	18	36,111	2,006	0,0034554		
Шип 3	17	33,851	1,991	0,0022814		
Шип 4	18	36,086	2,005	0,0045221		
Шип 5	18	35,95	1,997	0,0048807		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,005299	4	0,001325	0,3164776	0,866222804	2,480322306
Внутри групп	0,351612	84	0,004186			
Итого	0,35691	88				

а

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Шип 5	18	35,95	1,997	0,0048807		
Шип 6	17	34,005	2,000	0,0047535		
Шип 7	18	36,077	2,004	0,0055992		
Шип 8	18	35,949	1,997	0,0028952		
Шип 9	17	33,766	1,986	0,0072749		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,003108	4	0,000777	0,1536031	0,96087504	2,481661429
Внутри групп	0,41983	83	0,005058			
Итого	0,422938	87				

б

Рис. 6. Результаты 1-факторного дисперсионного анализа толщин шипов для левой (а) и правой (б) половин детали

Fig. 6. One-way ANOVA results of tenon thickness for left (a) and right (b) half of workpiece

В результате проведения 1-факторного дисперсионного анализа разброса размеров толщин шипов для левой половины шипов получена статистическая значимость  $p = 0,86$  и для правой –  $p = 0,96$ , что превышает уровень значимости  $\alpha = 0,05$ . Это не позволяет отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии влияния положения шипа на его точность. Таким образом, можно принять, что точность шипа не зависит от его положения. Критерий Фишера, определяющий отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой, для левой половины составляет 0,31, для правой – 0,15, что меньше критического значения 2,48. В соответствии с этим нулевая гипотеза не может быть отвергнута.

Далее приведены результаты 1-факторного дисперсионного анализа для проушин в левой и правой частях заготовки (рис. 7).

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Проушина 1	18	40,515	2,250833	0,0036654		
Проушина 2	18	40,017	2,223167	0,0057131		
Проушина 3	18	39,294	2,183	0,0046147		
Проушина 4	18	39,643	2,202389	0,0068139		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,045606	3	0,015202	2,9224619	0,0400904	2,739502302
Внутри групп	0,353721	68	0,005202			
Итого	0,399327	71				

а

Однофакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ						
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Проушина 5	18	40,03	2,223889	0,00538		
Проушина 6	18	39,429	2,1905	0,008663		
Проушина 7	18	39,743	2,207944	0,007542		
Проушина 8	18	42,302	2,350111	0,023693		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Между группами	0,284816	3	0,094939	8,387127	8,0514E-05	2,739502302
Внутри групп	0,769731	68	0,01132			
Итого	1,054547	71				

б

Рис. 7. Результаты 1-факторного дисперсионного анализа ширин проушин для левой (а) и правой (б) половин детали

Fig. 7. One-way ANOVA results of mortise width for left (a) and right (b) half of workpiece

Результаты дисперсионного анализа для распределения ширин проушин показывают обратную относительно распределения толщин шипов ситуацию: статистическая значимость  $p = 0,04$  для левой половины шипов и  $p = 0,00008$  для правой меньше уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . При этом критерий Фишера для левой части составил 2,92, для правой – 8,39, что больше критического значения 2,74. Это позволяет опровергнуть нулевую гипотезу об отсутствии влияния положения проушины на ее точность.

*Определение качества точности сформированных шипов и проушин.* Для нахождения средних квалитетов толщин шипов и ширин проушин был рассчитан средний допуск  $A_{\text{ср}}$ . Соответствие квалитету устанавливали по ГОСТ 6449.1–82 и ГОСТ 25346–89 в зависимости от среднего допуска. С целью исключения влияния знака отклонения от номинального значения при расчете среднего допуска авторами была предложена следующая формула:

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_{\text{ном}} - S_{\text{действ}}|}{n},$$

где  $S_{\text{ном}}$ ,  $S_{\text{действ}}$  – соответственно номинальная и действительная толщина шипа или ширина проушины, мм;  $n$  – количество измерений.

Результаты определения средних квалитетов толщин шипов и ширин проушин приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Средние квалитеты толщин шипов**  
**Mean tolerance grades of tenon thickness**

Шип	$A_{\text{ср}}$ , мм	Квалитет	Средняя толщина, мм
1	0,055	IT11	2±0,028
2	0,050	IT11	2±0,025
3	0,049	IT11	2±0,025
4	0,053	IT11	2±0,026
5	0,057	IT11	2±0,029
6	0,064	IT12	2±0,032
7	0,062	IT12	2±0,031
8	0,040	IT11	2±0,020
9	0,078	IT12	2±0,039

Таблица 4

**Средние квалитеты ширин проушин**  
**Mean tolerance grades of mortise widths**

Проушина	$A_{\text{ср}}$ , мм	Квалитет	Средняя ширина, мм
1	0,057	IT11	2,2±0,029
2	0,060	IT11	2,2±0,030
3	0,053	IT11	2,2±0,027
4	0,067	IT12	2,2±0,033
5	0,063	IT12	2,2±0,031
6	0,068	IT12	2,2±0,034
7	0,068	IT12	2,2±0,034
8	0,164	IT14	2,2±0,082

Анализ среднего допуска толщин шипов и ширин проушин показывает достаточно равномерный разброс размеров для левых крайних и центральных

элементов: (шипы № 1–5, проушины № 1–3), не превышающий допуска 11-го качества. Шипы и проушины, расположенные ближе к крайней правой зоне (шипы № 6–9, проушины № 4–8) имеют больший разброс размеров, соответствующий 12-му качеству. Для крайней проушины № 8 интервал варьирования соответствует 14-му качеству.

Возможными причинами такого отклонения могут являться погрешность инструмента или перекося верхней плиты прессы относительно его стола и, как следствие, перекося пуансона относительно заготовки.

*Прогнозируемые размеры элементов шиповых соединений.* Полученные данные (табл. 1 и 2) представляют из себя подмножество наблюдений генеральных совокупностей. Статистическая обработка этих показателей позволяет с вероятностью 95 % определить интервалы размеров элементов каждой генеральной совокупности. С применением инструментов описательной статистики установлены доверительные интервалы отклонений ширин и толщин элементов. В результате были спрогнозированы размеры толщин шипов и ширин проушин, где номинальной шириной (толщиной) элемента является среднее значение, а отклонением служит доверительный интервал, также определены качества этих размеров (табл. 5 и 6). Прогнозируемые размеры – это размеры, которые с 95%-й вероятностью будут получены при данном способе формирования профиля шипов.

Таблица 5

**Прогнозируемая толщина шипов, мм**  
**Predicted tenon thickness, mm**

Шип	Доверительный интервал	Средняя прогнозируемая толщина	Допуск	Квалитет
1	0,037	1,986±0,037	0,075	IT12
2	0,029	2,006±0,029	0,058	IT11
3	0,032	2,002±0,032	0,063	IT12
4	0,033	2,005±0,033	0,067	IT12
5	0,035	1,997±0,035	0,069	IT12
6	0,043	2,013±0,043	0,086	IT12
7	0,037	2,004±0,037	0,074	IT12
8	0,027	1,997±0,027	0,054	IT11
9	0,052	1,972±0,052	0,103	IT13

Таблица 6

**Прогнозируемая ширина проушин, мм**  
**Predicted mortise width, mm**

Проушина	Доверительный интервал	Средняя прогнозируемая ширина	Допуск	Квалитет
1	0,030	2,251±0,030	0,060	IT11
2	0,038	2,223±0,038	0,075	IT12
3	0,034	2,183±0,034	0,068	IT12
4	0,041	2,202±0,041	0,082	IT12
5	0,036	2,224±0,036	0,073	IT12

Окончание табл. 6

Проушина	Доверительный интервал	Средняя прогнозируемая ширина	Допуск	Квалитет
6	0,046	2,191±0,046	0,093	IT12
7	0,043	2,208±0,043	0,086	IT12
8	0,077	2,350±0,077	0,153	IT14

Анализ прогнозируемых размеров шипов и проушин показывает, что относительно номинального размера ширины проушины 2,2 мм и толщины шипа 2 мм поля допусков являются несимметричными, и это затрудняет определение основных отклонений. Для их установления приняли, что вероятные поля допусков могут быть симметричны относительно номинальных размеров, максимальные отклонения при этом соответствуют наибольшим отклонениям от номинального размера, определенным по данным табл. 5, 6. Полученные прогнозируемые поля допусков толщины шипов и ширины проушин приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Прогнозируемые поля допусков ширины проушин и толщины шипов**  
**Predicted tolerance fields for mortise widths and tenon thicknesses**

Шип / проушина	Ширина проушины	Допуск ширины проушины	Поле допуска ширины проушины	Толщина шипа	Допуск толщины шипа	Поле допуска толщины шипа
1	2,2±0,066	0,132	JS13	2±0,051	0,102	js12
2	2,2±0,042	0,084	JS 12	2±0,035	0,070	js 12
3	2,2±0,034	0,068	JS 12	2±0,033	0,066	js 12
4	2,2±0,023	0,046	JS 11	2±0,038	0,076	js 12
5	2,2±0,042	0,084	JS 12	2±0,038	0,076	js 12
6	2,2±0,033	0,065	JS 12	2±0,056	0,112	js 13
7	2,2±0,030	0,059	JS 11	2±0,041	0,082	js 12
8	2,2±0,188	0,377	JS 15	2±0,030	0,060	js 11
9	–	–	–	2±0,080	0,160	js 14

Прогнозируемые допуски размеров шипов и проушин соответствуют требованиям, предъявляемым к допускам элементов шипового соединения для последующего склеивания заготовок по длине [7, 16, 17]. При этом с вероятностью 95 % толщины всех шипов и ширины всех проушин будут находиться внутри поля допуска JS13/js13, исключение составляют крайние правые элементы.

### Выводы

1. Установлено, что точность толщин шипов и ширин проушин, получаемых торцовым прессованием без применения обжимной оснастки, при точности элементов пуансона, соответствующей 9 квалитету, в основном (для центральных шипов) соответствует 12-му квалитету.

2. Спрогнозирована вероятностная точность элементов, формируемых торцовым прессованием, не ниже 12-го квалитета; при этом при предсказывании симметричных полей допусков точность не превышает 13-го квалитета,

полученный результат дает основание полагать, что формируемые элементы шипового соединения соответствуют требованиям, предъявляемым к заготовкам для сращивания по длине.

3. Установлено, что точность размеров крайних правых шипов и проушин ниже. Это может быть обусловлено, во-первых, неправильностью базирования заготовки, что объясняется конструктивными особенностями пресового оборудования, во-вторых, отсутствием боковой поддержки материала древесины. Несоответствие стандартам размеров крайних шипов может повлечь за собой уменьшение прочности шипового соединения по длине. Для устранения этих факторов необходимо проектировать специальную обжимную технологическую оснастку, позволяющую обеспечить корректность взаимного позиционирования заготовки и пуансона, а также боковую поддержку крайних шипов при прессовании. Это является задачей следующей стадии исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Барташевич А.А., Трофимов С.П.* Конструирование мебели. Минск: Современ. шк., 2006. 336 с.

Bartashevich A.A., Trofimov S.P. *Furniture Construction*. Minsk, Sovremennaya shkola Publ., 2006. 336 p. (In Russ.).

2. *Бендерук Т.Г., Задраускайте Н.О., Рудная Н.С.* Роль склеивания древесины // World science: problems and innovations: сб. ст. LVI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 59–61.

Benderuk T.G., Zadrauskaite N.O., Rudnaya N.S. The Role of Wood Bonding. *World Science: Problems and Innovations: Proceedings of the LVI International Scientific-Practical Conference*. Penza: Nauka i Prosveshchenie Publ., 2021, pp. 59–61. (In Russ.).

3. *Ведерников Я.Д., Рублева О.А.* Обоснование конструктивных параметров станочного приспособления для торцового прессования древесины // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2023. С. 305–311.

Vedernikov Ya.D., Rubleva O.A. Justification of Design Parameters of Machine Devices for Pressing Wood in Longitudinal Direction. *Effective Response to Modern Challenges Taking into Account the Interaction of Man and Nature, Man and Technology: Socio-Economic and Environmental Problems of the Forest Complex: Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference*. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University Publ., 2023, pp. 305–311. (In Russ.).

4. *Ведерников Я.Д., Рублева О.А., Васильева Е.С.* Обоснование конструктивных особенностей устройства для пластического деформирования древесины // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: материалы XIX Междунар. евразийск. симп. Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехн. ун-т, 2024. С. 43–48.

Vedernikov Ya.D., Rubleva O.A., Vasilieva E.S. Justification of the design features of the device for plastic deformation of wood. *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century: Proceedings of the XIX International Eurasian Symposium*. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University Publ., 2024, pp. 43–48. (In Russ.).

5. *Волынский В.Н.* Технология клееных материалов. СПб.: Профикс, 2008. 392 с.  
Volynskiy V.N. *Technology of Glued Materials*. Saint Petersburg, Profiks Publ., 2008. 392 p. (In Russ.).

6. Гайдук С.С. Склеивание древесины различных пород // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием). Минск: Белорус. гос. технол. ун-т, 2022. С. 240–242.

Gayduk S.S. Gluing of Various Wood Species. *Forest Engineering, Materials Science and Design: Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of Teaching Staff, Researchers and Graduate Students (with international participation)*. Minsk: Belarusian State Technological University Publ., 2022, pp. 240–242. (In Russ.).

7. Гороховский А.Г., Рублева О.А. Анализ современных требований по выбору посадок для клеевых соединений по длине на прямоугольные шипы // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: Вологодск. гос. ун-тет, 2019. С. 135–138.

Gorokhovskiy A.G., Rubleva O.A. Analysis of Modern Requirements for Selecting Fits for Adhesive Joints with Rectangular Tenons. *Current Problems of Forest Sector Development: Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference*. Vologda: Vologda State University Publ., 2019, pp. 135–138. (In Russ.).

8. Жуков В.П. Технология склеивания древесины. Воронеж: ВГЛТИ, 1981. 79 с.  
Zhukov V.P. Wood Gluing Technology. Voronezh, VGLTI Publ., 1981. 79 p. (In Russ.).

9. Куликов И.В. Основы взаимозаменяемости и технические измерения в деревообработке. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 375 с.

Kulikov I.V. Fundamentals of Interchangeability and Technical Measurements in Woodworking. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966. 375 p. (In Russ.).

10. Патент № 2471614 РФ. Способ формирования элементов шиповых соединений деревянных заготовок: № 2011116271/13; заявл. 25.04.2011; опубл. 10.01.2013 / О.А. Рублева.

Rubleva O.A. *Method of Forming Finger Joints in Wood Blanks*. Patent RF no. RU 2471614 C1, 2013. (In Russ.).

11. Патент № 2834044 С1 РФ, МПК В27М 1/02. Устройство для прессования прямоугольных шипов в торцах деревянных заготовок: заявл. 03.10.2024; опубл. 03.02.2025 / О.А. Рублева, Я.Д. Ведерников.

Rubleva O.A., Vedernikov Y.D. Device for Pressing Rectangular Tenons in Ends of Wooden Workpieces. Patent No. 2834044 C1 RF, IPC B27M 1/02.2025. (In Russ.).

12. Пластинин С.Н. Производство клееной продукции на лесопильных предприятиях. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 48 с.

Plastinin S.N. *Manufacturing of Glued Products at Sawmills*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 48 p. (In Russ.).

13. Рублева О.А. Формирование прямоугольных шипов способом торцового прессования // Лесотехн. журн. 2013. № 4 (вып. 12). С. 126–133.

Rubleva O.A. Formation of Rectangular Tenons by Mechanical Pressing Method. *Lesotekhnicheskiy zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2013, no. 4(12), pp. 126–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/2191>

14. Рублева О.А. Опыт применения штампового инструмента для формирования прямоугольных проушин и шипов // Деревообаб. пром-сть. 2020. № 2. С. 27–34.

Rubleva O.A. Experience of Using Punching Tool for Shaping Rectangular Mortises and Tenons. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' = Woodworking Industry*, 2020, no. 2, pp. 27–34. (In Russ.).

15. Рублева О.А. Технология формирования клеевых соединений на прессованные шипы // Деревообаб. пром-сть. 2020. № 3. С. 19–26.

Rubleva O.A. Technology of Joints Forming with Pressed Tenons. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' = Woodworking Industry*, 2020, no. 3, pp. 19–26. (In Russ.).

16. Рублева О.А., Гороховский А.Г. Прочность склеивания древесины по длине на прямоугольные шипы // Хвойн. бореал. зоны. 2019. Т. 37, № 5. С. 358–366.

Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G. Strength of End Joints with Rectangular Fingers. *Khvoynye boreal'noy zony* = Conifers of the Boreal Zone, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 358–366. (In Russ.).

17. Рублева О.А., Гороховский А.Г. Экспериментальная оценка прочности склеивания древесины по длине на прямоугольные прессованные шипы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 128–142.

Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G. Experimental Evaluation of Strength of End Joints with Rectangular Pressed Fingers. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 128–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-128-142>

18. Рублева О.А., Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Васильева Е.С., Ведерников Я.Д. Оценка влияния геометрических параметров прямоугольных шипов и расхода клея на прочность склеивания древесины по длине // Деревообработ. пром-сть. 2024. № 4. С. 11–23.

Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Vasilyeva E.S., Vedernikov Ya.D. Evaluation of the Effect of Geometric Parameters of Rectangular Tenons and Glue Consumption on the Strength of End Joints. *Derevoobrabatativaushaya promishlennost'* = Woodworking industry, 2024, no. 4, pp. 11–23. (In Russ.).

19. Фрейдин А.С., Вуба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 224 с.

Freydin A.S., Vuba K.T. *Prediction of the Properties of Adhesive Wood Joints*. Moscow, *Lesnaya promyshlennost'* Publ., 1980. 224 p. (In Russ.).

20. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб.: СПбГУ, 1992. 164 с.

Chubinskiy A.N. *Formation of Adhesive Joints of Wood*. St. Petersburg, SPbGU Publ., 1992. 164 p. (In Russ.).

21. Zakiah Ahmad, Wei Chen Lum, Seng Hua Lee, Mohd Azran Razlan, Wan Hazira Wan Mohamad. Mechanical Properties of Finger Jointed Beams Fabricated from Eight Malaysian Hardwood Species. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 145, pp. 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016>

22. Aicher S., Radovic B. Investigations on the Influence of Finger-Joint Geometry on Tension Strength of Finger-Jointed Glulam Lamellas. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1999, vol. 57, no. 1, pp. 1–11.

23. Ayarkwa J., Hirashima Y., Sasaki Y., Yamasaki M. Influence of Finger-Joint Geometry and End Pressure on Tensile Properties of Three Finger-Jointed Tropical African Hardwoods. *Southern African Forestry Journal*, 2000, vol. 188, no. 1, pp. 37–49.

24. Barboutis I., Vasileiou V. Strength of Fingerjointed Beech Wood (*Fagus sylvatica*) Constructed with Small Finger Lengths and Bonded with PU and PVAC Adhesives. *PROLigno*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 359–364.

25. Derikvand M., Pangh H., Ebrahimi G. Experimental Shape Optimization of Floating-Tenon Connections. *The 27th International Conference Research for Furniture Industry*, 2015, pp. 39–47.

26. Džinčić I., Živanić D. The Influence of Fit on the Distribution of Glue in Oval Tenon/Mortise Joint. *Wood Research*, 2014, vol. 59, no. 2, pp. 297–302.

27. Jokerst R.W. Finger-Jointed Wood Products. Research Paper FPL 382. *Forest Products Laboratory*, 1981. 26 p.

28. Hu W.G., Fu W.L., Guan H.Y. Optimal Design of Stretchers Positions of Mortise and Tenon Joint Chair. *Wood research*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 505–516.

29. Lara-Bocanegra A.J., Majano-Majano A., Crespo J., Guaita M. Finger-Jointed Eucalyptus Globulus with 1C-PUR Adhesive for High Performance Engineered Laminated Products. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 135, pp. 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004>

30. Lee S.J., Eom C.D., Kim K.M. Structural Performance of Finger-Jointed Lumber with Different Joint Configurations. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2011, vol. 39, no. 2, pp. 172–178.

31. Likos E., Haviarova E., Eckelman C.A., Erdil Y.Z., Ozcifici A. Effect of Tenon Geometry, Grain Orientation, and Shoulder on Bending Moment Capacity and Moment Rotation Characteristics of Mortise and Tenon Joints. *Wood and Fiber Science*, 2012, vol. 44, iss. 4, pp. 462–469.

32. Muthumala C.K., De Silva S., Alwis P.L.A.G., Arunakumara I.K.K.U., Marikar F.M.M.T. Assessment of Quality Parameters of Finger-Jointed Timber Products: A Review. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 2025, pp. 65–82. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.1.5>

33. Özçiğçi A., Yapıcı F. Structural Performance of the Finger-Jointed Strength of Some Wood Species with Different Joint Configurations. *Construction and Building Materials*, 2008, vol. 22, no. 7, pp. 1543–1550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020>

34. Prekrat S., Smardzewski J. Effect of Glueline Shape on Strength of Mortise and Tenon Joint. *Drvna industrija*, 2010, vol. 61, no. 4, pp. 223–228.

35. Ratnasingam J., Scholz F. Optimization of Fingerjointing in Rubberwood Processing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2009, vol. 67, no. 2, pp. 241–242. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0295-8>

36. Ryu H.S., Ahn S.Y., Park H.M., Byeon H.S., Kim J.M. Effect of Distance between Finger Tip and Root Width on Compressive Strength Performance of Finger-Jointed Timber. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2004, vol. 32, iss. 4, pp. 66–73.

37. Tankut N. The Effect of Adhesive Type and Bond Line Thickness on the Strength of Mortise and Tenon Joints. *International journal of adhesion and adhesives*, 2007, vol. 27, iss. 6, pp. 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.07.003>

38. Tran V.D., Oudjene M., Méausoone P.J. FE Analysis and Geometrical Optimization of Timber Beech Finger-Joint under Bending Test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, vol. 52, pp. 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007>

39. Vassiliou V., Barboutis I., Ajdinaj D., Thoma H. PVAc Bonding of Fingerjointed Beech Wood Originated from Albania and Greece. *Wood Science and Engineering in the third millennium – ICWSE: Proceedings of the International Conference, Brasov, Romania, 2009*, pp. 715–721.

40. Vrazel M., Sellers Jr.T. The Effects of Species, Adhesive Type, and Cure Temperature on the Strength and Durability of a Structural Finger-Joint. *Forest products journal*, 2004, vol. 54, iss. 3, pp. 66–76.

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

Original article

УДК 674

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-190-200

## The Relationships between Fiber Parameters and Mechanical Properties of Timber Species

*Chaminda Muthumala*<sup>1</sup>, *PhD*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-7717>

*Indika Arunakumara*<sup>2</sup>, *Prof.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7081-0215>

*Sudhira De Silva*<sup>3</sup>, *PhD, Prof.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-5097>

*Anura Alwis*<sup>4</sup>, *Prof.*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8888-4952>

*Faiz Marikar*<sup>5</sup>, *Director*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4579-7263>

<sup>1</sup>State Timber Corporation, Sampathpaya, Rajamalwatta Road, Battaramulla, 10120, Sri Lanka; ck\_muthumala@yahoo.com

<sup>2</sup>Department of Crop Science, Faculty of Agriculture, University of Ruhuna, 1100, Kamburupitiya, Sri Lanka; kkiuaruna@crop.ruh.ac.lk

<sup>3</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Ruhuna, Hapugala, Wakwella Road, Galle, 80000, Sri Lanka; sudhira@cee.ruh.ac.lk

<sup>4</sup>Department of Agricultural Engineering & Environmental Technology, Faculty of Agriculture, University of Ruhuna, Matara-Kamburupitiya Road, Mapalana, 81100, Sri Lanka; aalwis@ageng.ruh.ac.lk

<sup>5</sup>General Sir John Kotelawala Defence University, Kandawala Road, Ratmalana, 10390, Sri Lanka; faiz@kdu.ac.lk

---

Received on April 15, 2025 / Approved after reviewing on June 28, 2025 / Accepted on June 30, 2025

---

**Abstract.** This study investigates the variations in mechanical properties and fiber parameters, along with wood densities, of 7 timber species commonly used in Sri Lanka's furniture industry as a promising one. Key parameters measured include wood density, compressive strength (both parallel and perpendicular to grain), and static bending properties, following the standards outlined in BS 373:1957. Mechanical tests have been conducted using a universal testing machine (UTM-100PC), while fiber parameters have been analyzed via a modified Franklin's method. The results indicate no significant correlations between fiber parameters (fiber length, diameter, and wall thickness) and mechanical properties such as compression and bending strengths, including modulus of rupture and modulus of elasticity. However, the fiber parameters have exhibited a decreasing trend with increasing wood density. Notably, timber species with higher density and elevated Runkel ratios have demonstrated greater strength values, suggesting the influence of fiber wall thickness relative to pore size on mechanical performance. The findings obtained imply that wood density and fiber structural ratios play a more critical role in determining strength than isolated fiber dimensions. The study contributes to a better understanding of the physical and mechanical behavior of local timber species and provides valuable data for optimizing timber selection and processing in Sri Lanka's furniture manufacturing sector.

**Keywords:** density, fiber properties, mechanical test, timber

**For citation:** Muthumala C., Arunakumara I., De Silva S., Alwis A., Marikar F. The Relationships between Fiber Parameters and Mechanical Properties of Timber Species. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 190–200.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-190-200>

Научная статья

## Взаимосвязь между параметрами волокон и механическими свойствами древесных пород

**Ч. Мутхумала**<sup>1</sup>, *д-р наук*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-7717>

**И. Арунакумара**<sup>2</sup>, *проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7081-0215>

**С. Де Силва**<sup>3</sup>, *д-р наук, проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-5097>

**А. Алвис**<sup>4</sup>, *проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8888-4952>

**Ф. Марикар**<sup>5</sup>✉, *директор*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4579-7263>

<sup>1</sup>Государственная лесная корпорация, Сампатпайя, Раджамалуэтта-роуд, г. Баттарамулла, Шри-Ланка, 10120; ck\_muthumala@yahoo.com

<sup>2</sup>Университет Рухуны, г. Камбурупития, Шри-Ланка, 1100; kkiuaruna@crop.ruh.ac.lk

<sup>3</sup>Университет Рухуны, Хапагала, Ваквелла-роуд, г. Галле, Шри-Ланка, 80000; sudhira@cee.ruh.ac.lk

<sup>4</sup>Университет Рухуны, Магара-Камбурупития-роуд, дер. Мапалана, Шри-Ланка, 81100; aalwis@ageng.ruh.ac.lk

<sup>5</sup>Университет обороны им. генерала сэра Джона Котелавалы, Кандавала-роуд, Рамтамалана, Шри-Ланка, 10390; faiz@kdu.ac.lk✉

---

Поступила в редакцию 15.04.25 / Одобрена после рецензирования 28.06.25 / Принята к печати 30.06.25

---


**Аннотация.** Рассматриваются различия в механических свойствах и параметрах волокон, а также плотности древесины 7 пород, широко используемых в мебельной промышленности Шри-Ланки. К ключевым измеряемым параметрам в соответствии со стандартом BS 373:1957 относятся плотность древесины, прочность при сжатии (как параллельно, так и перпендикулярно волокнам) и при статическом изгибе. Механические испытания проводились с применением универсальной испытательной машины (UTM-100PC), а параметры волокон анализировались посредством модифицированного метода Франклина. Результаты демонстрируют отсутствие существенной корреляции между параметрами волокна (длина волокна, диаметр и толщина стенки) и механическими свойствами, такими как прочность на сжатие и изгиб, включая модуль разрыва и модуль упругости. Однако с увеличением плотности древесины параметры волокна демонстрируют тенденцию к ухудшению. Примечательно, что породы древесины с более высокой плотностью и повышенным коэффициентом Рункеля имеют большую прочность, что свидетельствует о влиянии соотношения толщины стенки волокна и просвета между волокнами на механические свойства. Полученные данные указывают на превалирующую роль при определении прочности волокон плотности древесины и структурных соотношений волокон по сравнению с размерами отдельных волокон. Исследование способствует пониманию физических и механических свойств местных пород древесины и оптимизации отбора и обработки древесины в процессе мебельного производства в Шри-Ланке.

**Ключевые слова:** плотность, характеристики волокна, механическое испытание, древесина

**Для цитирования:** Muthumala C., Arunakumara I., De Silva S., Alwis A., Marikar F. The Relationships between Fiber Parameters and Mechanical Properties of Timber Species // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 190–200. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-190-200>

---

©Muthumala C., Arunakumara I., De Silva S., Alwis A., Marikar F., 2026

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

### Introduction

The history of wood architecture reveals that architects and craftsmen with natural creative skills have existed from the beginning of civilization. As a result of low quality and strength of wood which has been used by these ancestral architects and craftsmen, some of the wood creations have not lasted for long time [10, 12].

Wood is an excellent material for roof and other construction works, furniture, interior decorations, doors and window frames, paneling, partition borders, floorings, wood carvings, musical instruments etc. Mechanical properties are very important in deciding on the applicability and suitability of timbers for both structural and non-structural purposes. However these properties vary with the species and also with some other factors such as moisture content, the number and degree of defects, etc.

In hardwood, the anatomical organization is made up by vessels, fibers, parenchyma cells and wood rays. Fibers are the principal element that is responsible for the strength of wood [11]. Fiber length, fiber cell wall thickness, pore diameter and size of the pits are the characteristics associated with wood properties such as wood density, modulus of rupture, modulus of elasticity, shrinkage etc. Wood density is an important property for both solid wood and fiber products [6]. Softwood fibers are generally long (2–3 mm) [2–4], while hardwood fibers are shorter (1 mm) and less flexible [15].

The Runkel ratio, commonly used in pulp and paper industry to assess fiber quality, is not a primary criterion for selecting wood in traditional furniture production. Instead, furniture manufacturing typically focuses on macroscopic properties such as strength, density, workability, and aesthetic appeal. However, the Runkel ratio may have indirect relevance in the furniture industry, particularly for engineered wood products like MDF or particleboard, where fiber morphology affects material performance. In such contexts, the Runkel ratio can provide useful insights into fiber rigidity and cell wall thickness, contributing to quality. The Runkel ratio, the ratio between fiber cell wall thickness and pore size determines the suitability of a fibrous material for pulp and paper production. If a wood species has a high Runkel ratio, its fibers are stiff and less flexible and have poor bonding abilities. The variations of the mechanical properties and fiber parameters of 7 timber species commonly used in furniture industry in Sri Lanka have been studied during this research.

### Materials and Methods

7 timber species commonly used for furniture manufacturing have been collected from the Southern and Central Provinces of Sri Lanka (Table 1).

Table 1

**Timber species selected for the research**

Common name	Botanical name	Family	Timber class*	Province
Rose gum	<i>Eucalyptus grandis</i>	Myrtaceae	2	Central
Jackfruit	<i>Artocarpus heterophyllus</i>	Moraceae	Luxury	Southern
Arjuna	<i>Terminalia arjuna</i>	Combretaceae	Special	
Mahogany	<i>Swietenia macrophylla</i>	Meliaceae	Luxury	
Caribbean pine	<i>Pinus caribaea</i>	Pinaceae	3	Central
Ceylon satinwood	<i>Chloroxylon swietenia</i>	Rutaceae	Luxury	Southern
Teak	<i>Tectona grandis</i>	Lamiaceae	Super luxury	

\*Source: Timber classification by State Timber Corporation, Sri Lanka.

The samples for the tests have been prepared from defect-free sawn woods.

*Determination of Wood Density.* Each timber species sample has been replicated 10 times. Wood density has been determined based on the volume when green and oven-dry weight. The dry weight of timber samples has been obtained by placing them in an oven at 105 °C for 48 h (BS EN 373:1957). Basic density has been calculated using the following equation:

$$\text{Basic Density} = \frac{\text{Oven-dry wood weight (kg)}}{\text{Volume of green wood (m}^3\text{)}}$$

The samples placed in normal room temperature conditions have shown good structural performance compared to the ones placed in hot and wet conditions [17].

*Determination of Moisture Content.* The samples (each measuring 20 × 20 × 20 mm) have been first weighed, and then oven-dried at 103 °C until a constant weight. The moisture content ( $r$ , %) of each sample has been determined using the equation below:

$$r = \frac{M_r - M_0}{M_0} \times 100,$$

where  $M_r$  is the weight of the moist sample;  $M_0$  is the weight of the fully dried sample.

*Measuring Fiber Dimensions.* Fiber morphological analysis has been performed according to the modified Franklin's method [7]. The matchstick size splints have been taken from the tangential section of timber samples and put into boiling tubes containing a mixture of glacial acetic acid and 30 % hydrogen peroxide (1:1 by volume). The purpose of using hydrogen peroxide has been to ensure dehydrating and bleaching the samples. The glacial acetic acid has been used to dissolve lignin enabling easy separation of the fibers (Fig. 1).

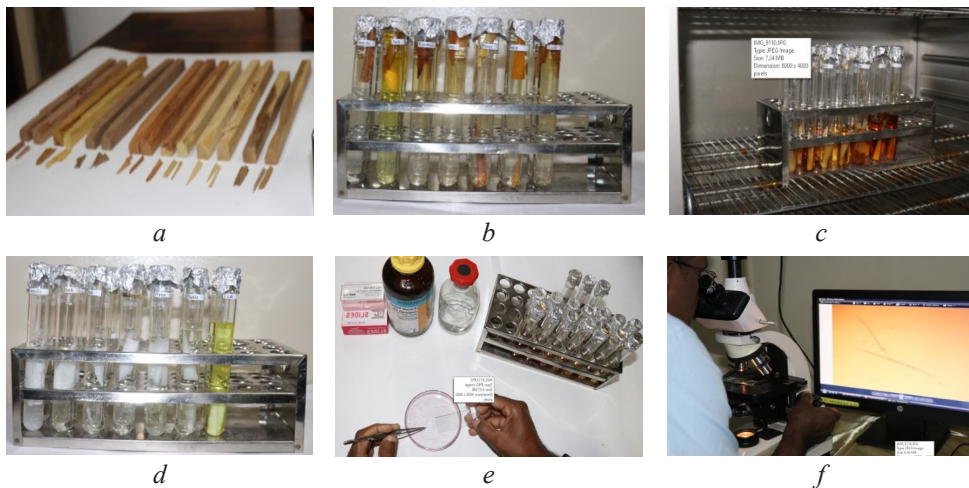


Fig. 1. The preparation of slides for measuring fiber properties:  
*a* – matchstick size splints taken from timber samples; *b* – splints dipped into the mixture of glacial acetic acid and hydrogen peroxide; *c* – rack with test tubes kept at 60 °C;  
*d* – test tubes after dissolving lignin; *e* – mounting the splints on the slides with Canada balsam; *f* – measuring fiber dimensions

The material in boiling tubes has transformed into pulp after keeping it at a temperature of 65 °C for a period of 24 h. Then the remains have been rinsed in distilled water and shaken gently to ensure measurable individual cells of xylem tissues. The fibers have been carefully removed using a painting brush and mounted on

the slides using Canada balsam. They have then been covered with cover slips, named and kept in an oven at 30° C for 2 days to complete drying. The micrographs have been taken to measure the fiber thickness, pore diameter and wall thickness. The fiber dimensions have been measured subjectively to minimize the possible variations in the fibers due to such factors as the age and sampling height of the tree, etc. [13, 14].

Micrometrics SE Premium 4.1 software has been used to determine the fiber dimensions.

*Calculating the Runkel Ratio.* The Runkel ratio has been calculated using the following equation [14]:

$$\text{Runkel ratio} = \frac{D_2 - D_1}{D_2},$$

where  $D_2$  is the cell thickness;  $D_1$  is the pore diameter and  $D_2 - D_1$  is the cell wall thickness.

*Determination of Flexural Strength.* The samples have been cut from defect-free, seasoned wood planks (average moisture content 12 %). 10 wood samples have been prepared representing each timber species. The dimensions of each replicate have been 20 × 20 × 300 mm. They have been prepared following the methods of testing the small clear samples as stated in BS 373:1957.

A universal testing machine (UTM-100PC) manufactured in Australia has been used for testing (Fig. 2). An assembling pressure of 6 MPa has been applied in this study [5, 19].



Fig. 2. The Universal testing machine (UTM-100PC)

Bending strength, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) values have been calculated using the equations below, respectively, corresponding to the test data:

$$\text{Bending Strength} = \frac{3F_1L_1}{2bd^2},$$

where  $F_1$  is the serviceability force (N);  $L_1$  is the length of the span (mm);  $b$  is the width of the sample (mm);  $d$  is the depth/thickness of the sample (mm).

$$\text{MOR} = \frac{3F_2L_1}{2bd^2},$$

where  $F_2$  is the maximum force (N);  $L_1$  is the length of the span (mm);  $b$  is the width of the sample (mm);  $d$  is the depth/thickness of the sample (mm).

$$\text{MOE} = \frac{F_3L_1^3}{4\delta bd^3},$$

where  $F_3$  is the maximum load at proportionate state (N);  $L_1$  is the length of the beam between supports (mm);  $b$  is the width of the sample (mm);  $d$  is the depth/thickness of the sample (mm);  $\delta$  is the deflection of timber sample (mm).

*Calculation of Compression Strength.* The samples prepared for compression parallel and perpendicular to grain are shown in Fig. 3.

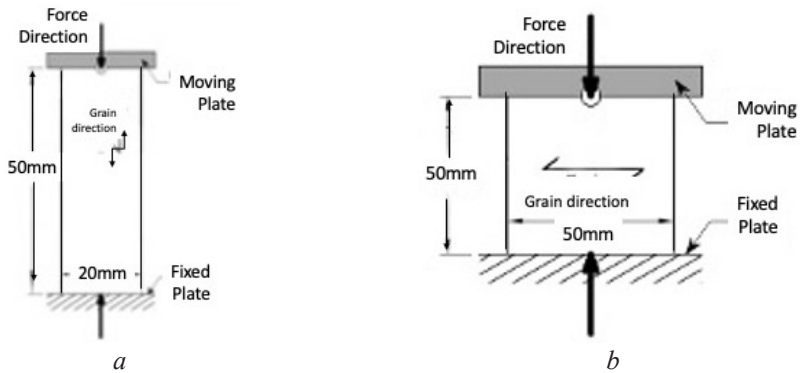


Fig. 3. The schematic presentation of compression tests: *a* – compression parallel to grain; *b* – compression perpendicular to grain

The load on timber section at proportionate state has been measured. The serviceability compressive strength has been calculated using the equation below.

$$\text{Serviceability compressive strength} = \frac{\text{Max load on the sample at proportionate state}}{\text{Load acting area}} \text{ N/mm}^2.$$

The direction of the load applied to the sample is shown in Fig. 4 and 5.

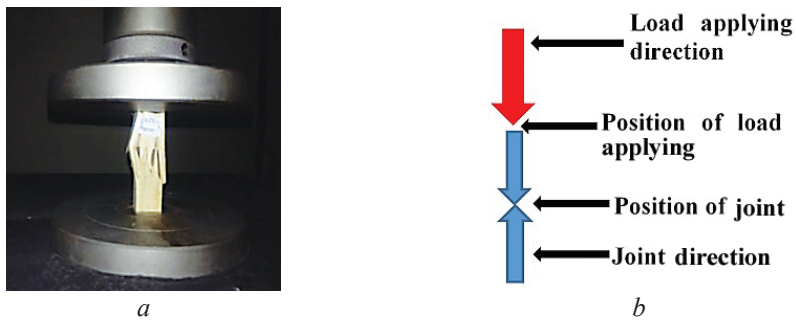


Fig. 4. The compression parallel to grain test: *a* – loading setup; *b* – load applying direction

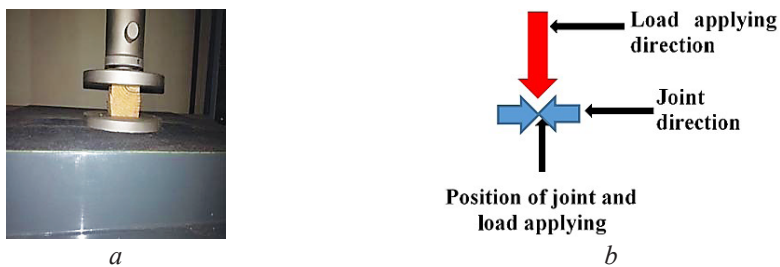


Fig. 5. The compression perpendicular to grain test: *a* – loading setup; *b* – load applying direction

*Results and Discussion*

The fiber parameters of 6 hardwood species and 1 softwood species have been compared as shown in Table 2.

Table 2

The fiber parameters of timber species

Timber species	Basic density, kg/m <sup>3</sup>	Average				The Runkel ratio
		fiber length, μm	fiber diameter, μm	pore diameter, μm	fiber wall thickness, μm	
Rose gum	570	1,147.72	20.64	13.47	3.59	0.35
Jackfruit	645	2,070.94	22.35	12.34	5.00	0.45
Arjuna	756	1,613.15	18.43	11.15	3.64	0.39
Mahogany	570	1,431.68	20.48	13.82	3.33	0.33
Caribbean pine	465	3,387.86	44.53	27.79	8.37	0.38
Ceylon satinwood	980	1,225.43	11.28	4.92	3.18	0.56
Teak	720	1,203.77	22.14	14.12	4.01	0.36

The highest average fiber length (3,387.86 μm) has been recorded in Caribbean pine and the lowest (1,147.72 μm) – in rose gum. As for average fiber diameter, the highest value (44.53 μm) has been recorded in Caribbean pine and the lowest (11.28 μm) – in Ceylon satinwood. The highest average pore diameter (27.79 μm) has been recorded in Caribbean pine and the lowest (4.92 μm) – in Ceylon satinwood. As for average fiber wall thickness, the highest measurement (8.37 μm) has been recorded in Caribbean pine and the lowest (3.18 μm) – in Ceylon satinwood. The thickness of the fiber cell wall is the major factor governing density and mechanical strength of hardwood timbers [18]. In present study it shows the similar trend and the Runkel ratio varies from 0.35 to 0.56, with Ceylon satinwood having the highest (0.56) Runkel ratio (Fig. 6).

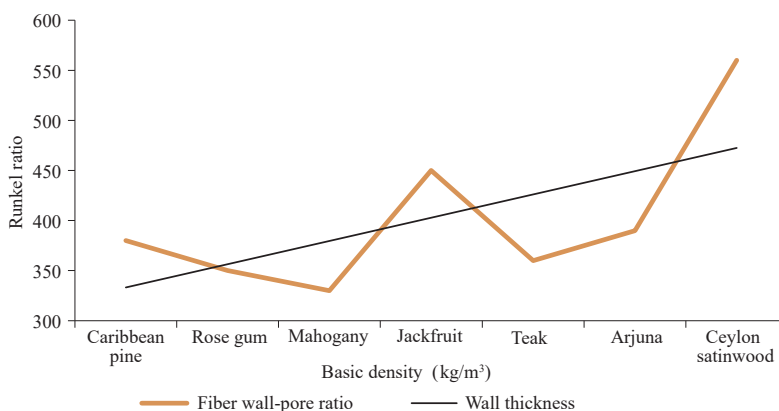


Fig. 6. The relationship between basic densities and the Runkel ratio in timber species under study

Average basic density values of 7 timber species are listed in a descending order: Ceylon satinwood – 980 kg/m<sup>3</sup>, arjuna – 756 kg/m<sup>3</sup>, teak – 720 kg/m<sup>3</sup>, jackfruit – 645 kg/m<sup>3</sup>, rose gum – 570 kg/m<sup>3</sup>, mahogany – 570 kg/m<sup>3</sup>, and Caribbean pine – 465 kg/m<sup>3</sup>. As depicted in Fig. 7, decreasing trends can be observed in the relationships between the fiber parameters and basic densities. Similar trend has been recorded in the research conducted by M. Kiaei and R.M. Roque in 2015 [8]. The effect of

fiber dimensions on the wood density of 3 parts (stem, branch and root wood) of alder wood has been determined by M. Kiaei and R.M. Roque in the stem, branch and root wood of *Alnus glutinosa* L. and the results emphasise that no significant differences have been found between fiber length, fiber diameter and pore diameter with wood density for each of the samples, while in the totality of the samples, there are significantly negative relationships between fiber length, fiber diameter and pore diameter with oven-dried wood densities.

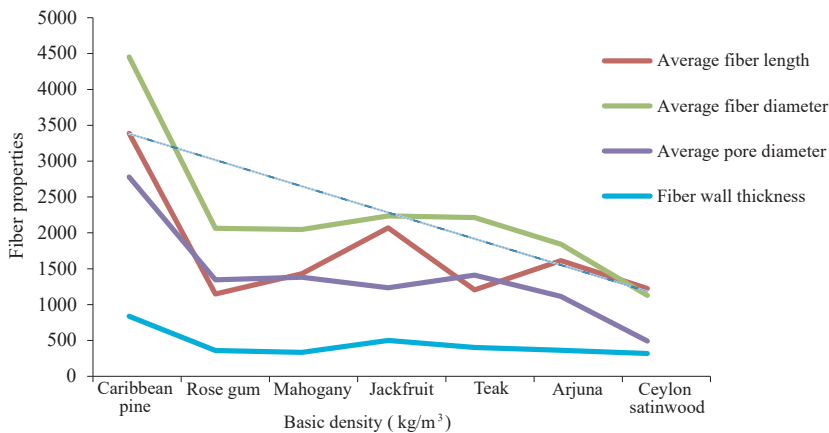


Fig. 7. The relationship between basic densities and fiber parameters in timber species under study

The mechanical properties of the selected 7 timber species are shown in Table 3.

Table 3

#### The mechanical properties of timber species under study

Timber species	Compression (N/mm <sup>2</sup> )		MOR (N/mm <sup>2</sup> )	Bending strength (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )
	parallel to grain	perpendicular to grain			
Rose gum	45.19	4.91	71.13	36.56	8,203.65
Jackfruit	41.02	13.42	64.47	36.55	5,765.51
Arjuna	33.81	7.39	52.86	21.21	4,615.56
Mahogany	30.31	8.20	60.16	32.58	5,775.78
Caribbean pine	45.78	5.53	59.90	28.56	7,149.67
Ceylon satinwood	46.36	16.65	106.6	50.85	10,819.05
Teak	47.40	9.20	84.36	44.36	8,538.29

The highest value of the compression parallel to grain (47.40 N/mm<sup>2</sup>) has been recorded in the teak sample and the lowest (30.31 N/mm<sup>2</sup>) – in mahogany. Ceylon satinwood and Caribbean pine, respectively, have shown the highest (16.65 N/mm<sup>2</sup>) and the lowest (5.53 N/mm<sup>2</sup>) values of compression perpendicular to grain. As for bending strength, the highest value (50.85 N/mm<sup>2</sup>) has been recorded in Ceylon satinwood while the lowest (21.21 N/mm<sup>2</sup>) has been revealed in arjuna. Ceylon satinwood and arjuna have shown the highest (106.6 N/mm<sup>2</sup>) and the least (52.86 N/mm<sup>2</sup>) MOR values, respectively. As for MOE, the highest value (10,819.05 N/mm<sup>2</sup>) has been recorded in Ceylon satinwood and the lowest (4,615.56 N/mm<sup>2</sup>) – in arjuna.

Table 4

**Regression R-squared values of fiber parameters for timber species under study**

Mechanical properties	Fiber parameters	R-Sq, %	R-Sq (adjusted), %	Significant <i>P</i> value
MOR	Length	20.6	4.8	0.306
Bending strength		21.1	5.4	0.299
MOE		8.7	0	0.521
Bending	Average diameter	19.5	3.4	0.321
MOR		23.4	8.1	0.237
MOE		5.6	0	0.608
Bending strength	Wall thickness	11.2	0	0.463
MOR		12.3	0	0.440
MOE		2.1	0	0.754
Compression parallel to grain	Length	1.1	0	0.821
	Diameter	4.1	0	0.662
	Wall thickness	9.8	0	0.493
Compression perpendicular to grain	Length	6.9	0	0.569
	Diameter	31.6	17.9	0.189
	Wall thickness	10.6	0	0.477

No significant correlations among fiber parameters (fiber length, fiber diameter and fiber wall thickness) and strength values (compression parallel and perpendicular to grain) have been observed (significant *P* value > 0.05). Similarly no significant correlations have been found between fiber parameters (fiber length, fiber diameter and fiber wall thickness) and bending strength, MOR and MOE (significant *P* value > 0.05) (Table 4). Previous research conducted by J. Baar et al. in 2014 has revealed a weak correlation between wood density and MOR [1].

However according to the research conducted by P.K. Thulasidas et al. (2001) on the fiber length of teak, the wet site home-gardened one has exhibited shorter fiber length (1.16 mm) than the dry and plantation site ones with values equaling 1.24 mm each [4, 16]. Hence, the habitat also affects the results. Another research has shown that nutrient distribution has a significant positive correlation with wood quality, wood density and fiber length [5, 9].

### Conclusion

This study has been aimed at assessing the relationships between fiber parameters and mechanical properties of 7 wood species: rose gum (*Eucalyptus grandis*), jackfruit (*Aartocarpus heterophyllus*), arjuna (*Terminalia arjuna*), mahogany (*Swietenia macrophylla*), Caribbean pine (*Pinus caribaea*), Ceylon satinwood (*Chloroxylon swietenia*) and teak (*Tectona grandis*). The highest average fiber length, fiber diameter, pore diameter and fiber wall thickness have been recorded in Caribbean pine (softwood species).

While the Runkel ratio is primarily used in the pulp and paper industry to evaluate fiber quality, it also holds contextual relevance in the furniture industry, particularly in relation to engineered wood products. Although studies indicate no significant correlations between fiber parameters (fiber length, diameter, and wall thickness) and mechanical properties such as compression strength (parallel and perpendicular to grain), modulus of rupture, and modulus of elasticity, wood's structural components

nevertheless exert influence. Mechanical properties arise from complex interactions among anatomical features, including cell wall thickness and density, which more directly affect strength and stiffness. Thus, fiber parameters contribute indirectly via their effects on wood structure and density, rather than through simple direct correlations. For instance, Ceylon satinwood exhibits the highest mechanical strength, density, and Runkel ratio, suggesting that in some species, denser fiber structures may correspond to stronger mechanical performance. Therefore, while not a standalone selection criterion, the Runkel ratio can still offer valuable supplementary insight into the internal structure of wood that may, in certain cases, align with desirable physical and mechanical properties for furniture applications.

## REFERENCES

1. Baar J., Tippner J., Rademacher P. Prediction of Mechanical Properties – Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity – of Five Tropical Species by Nondestructive Methods. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 239–252. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>
2. Bardage S.L. Three-Dimensional Modeling and Visualization of Whole Norway Spruce Latewood Tracheids. *Wood and Fiber Science*, 2001, vol. 33, no. 4, pp. 627–638.
3. Brandström J., Bardage S.L., Daniel G., Nilsson T. The Structural Organization of the S1 Cell Wall Layer of Norway Spruce Tracheids. *IAWA Journal*, 2003, vol. 24, no. 1, pp. 27–40. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000318>
4. *British Standard 373: 1957. Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*. London, British Standards Institution, 1957. 24 p.
5. Castro G., Paganini F. Parameters Affecting End Finger Joint Performance in Poplar Wood. *International Conference of IUFRO S 5.02 Timber Engineering*. Denmark, Copenhagen, 1997. 10 p.
6. De Guth E.B. Relationship between Wood Density and Tree Diameter in *Pinus selliottii* of Missionnes, Argentina. International Union of Forest Research Organizations. Oxford, 1980, Division 3, pp. 30–40.
7. Franklin G.L. Preparations of Thin Sections of Synthetic Resins and Wood-Resin Composites, and a New Macerating Method for Wood. *Nature*, 1945, vol. 155, art. no. 51. <https://doi.org/10.1038/155051a0>
8. Kiaei M., Roque R.M. Physical Properties and Fiber Dimension in Stem, Branch and Root of Alder Wood. *Fresinus Environmental Bulletin*, 2015, PSP vol. 24, no. 1b, pp. 335–342.
9. Maharani R., Fernandes A. Correlation between Wood Density and Fiber Length with Essential Macro-Nutrients on Base of Stem of *Shorea leprosula* and *Shorea parvifolia*. *KnE Life Sciences*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 625–629. <https://doi.org/10.18502/cls.v2i1.231>
10. Muthumala C.K., Amarasekara H.S. Investigation the Authenticity of Local and Imported Timber Species in Sri Lanka. *Proceeding of International Forestry and Environment Symposium*, 2013, vol. 18, pp. 95–96. <https://doi.org/10.31357/fesympo.v18i0.1945>
11. Panshin A.J., de Zeeuw C. *Textbook of Wood Technology*: 4th ed. New York, McGraw-Hill Book Company, 1980. 722 p.
12. Ruwanpathirana N.D., Muthumala C.K. *Wooden Wonders of Sri Lanka*. Sri Lanka, Battaramulla, State Timber Corporation, 2010, vol. 8, pp. 8–11.
13. San H.P., Li K.L., Cheng Z.Z., Tang C.H., Wong Y.S., Foo S.L., Hun A.T., Fong W.K. Anatomical Features, Fiber Morphological, Physical and Mechanical Properties of Three Years Old New Hybrid *Paulownia*: Green Paulownia. *Research Journal of Forestry*, 2016, vol. 10, iss. 1, pp. 30–35. <https://doi.org/10.3923/rjf.2016.30.35>
14. Smook G.A. *Handbook for Pulp and Paper Technologists*: 3rd ed. Canada, Vancouver, Bellingham, Angus Wilde Publications Inc., 2003. 425 p.

15. Tabarsa T., Chui Y.H. Characterizing Microscopic Behavior of Wood under Transverse Compression. Part II. Effect of Species and Loading Direction. *Wood and Fiber Science*, 2001, vol. 33, no. 2, pp. 223–232.

16. Thulasidas P.K., Bhat K.M. Mechanical Properties and Wood Structure Characteristics of 35-Year Old Home-Garden Teak from Wet and Dry Localities of Kerala, India in Comparison with Plantation Teak. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2012, vol. 9, pp. 23–32. <https://doi.org/10.1007/s13196-012-0062-7>

17. Vievek S., De Silva S., De Silva S.G.H.M.J., Muthumala C.K. Finger Joints and Their Structural Performance in Different Exposure Conditions. *The 7th International Conference on Sustainable Built Environment*. Sri Lanka, Kandy, 2016, pp. 204–210.

18. Wiedenhoef A. Structure and Function of Wood. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*: Centennial Ed. Wisconsin, Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Gen. Tech. Report FPL, GTR-190, 2010, chapt. 3, pp. 3.1–3.18.

19. Yeh M.-C., Lin Y.-L., Huang Y.-C. Evaluation of the Tensile Strength of Structural Finger-Jointed Lumber. *Taiwan Journal of Forest Science*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 59–70.

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



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

Научная статья

УДК 676.023.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-201-210

### Технология отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б

**Ф.В. Лапаев**<sup>✉</sup>, аспирант; ResearcherID: [MGT-7454-2025](https://orcid.org/0009-0008-1823-3597),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1823-3597>

**Л.Г. Махотина**, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [V-9090-2017](https://orcid.org/0000-0001-8784-967X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8784-967X>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; [filipp.lapaev@inproec.com](mailto:filipp.lapaev@inproec.com)<sup>✉</sup>, [lusi\\_makhotina@mail.ru](mailto:lusi_makhotina@mail.ru)

---

*Поступила в редакцию 27.02.25 / Одобрена после рецензирования 16.05.25 / Принята к печати 19.05.25*

---

**Аннотация.** В настоящее время отбелке подвергают вторичное волокно из макулатуры, состоящей из белых видов бумаги, для производства из него изделий санитарно-гигиенического назначения. В данной работе исследована возможность отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б (отходы использования гофрированного и коробочного картона) для его вовлечения в производство макулатурного коробочного картона WLC с белым покровным слоем вместо беленой сульфатной целлюлозы, применяемой на данный момент. Анализ литературных источников позволил установить, что наиболее перспективный способ отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС5Б – отбелка за счет обесцвечивания хромофорных групп пероксидом водорода. Данный способ является более экологичным по сравнению с другими, т. к. его использование не предполагает включения в процесс хлорсодержащих реагентов и требует меньше энергетических затрат за счет отсутствия делигнификации. В ходе исследования выявлены оптимальные технологические параметры отбелки: концентрация пероксида водорода – 30 %, продолжительность отбелки – 60 мин, температура процесса – 70 °С. Однако при данных технологических параметрах удалось повысить белизну ISO только с 23 до 36 % с увеличением оптических свойств без значительного ухудшения физико-механических показателей, т. к. отбелка почти не оказала влияние на морфологию волокна. При более «жестких» технологических параметрах белизна возрасла с 23 до 50 %, но при этом заметно снизились прочностные характеристики волокон. Также было отмечено уменьшение содержания лигнина после отбелки в жестких условиях по технологии TCF.

**Ключевые слова:** отбелка, вторичное волокно, макулатура, пероксид водорода, лайнер с белым покровным слоем, коробочный картон

**Для цитирования:** Лапаев Ф.В., Махотина Л.Г. Технология отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 201–210.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-201-210>

---

© Лапаев Ф.В., Махотина Л.Г., 2026

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

Original article

## Technology for Bleaching Secondary Fiber from Waste Paper Grade MS-5B (Old Corrugated Cardboard, OCC)

**Filipp V. Lapaev**<sup>✉</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [MGT-7454-2025](https://orcid.org/0009-0008-1823-3597),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1823-3597>

**Ludmila G. Makhotina**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-9090-2017](https://orcid.org/0000-0001-8784-967X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8784-967X>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; [filipp.lapaev@inproec.com](mailto:filipp.lapaev@inproec.com)<sup>✉</sup>, [lusi\\_makhotina@mail.ru](mailto:lusi_makhotina@mail.ru)

---

Received on February 27, 2025 / Approved after reviewing on May 16, 2025 / Accepted on May 19, 2025

---

**Abstract.** Currently, secondary fiber from waste paper, consisting of white types of paper, is subjected to bleaching for the production of sanitary and hygienic products. The aim of this paper is to investigate the possibility of bleaching secondary fibre from MS-5B waste paper (waste from corrugated and boxboard) for its use in the production of WLC boxboard with a white cover layer instead of the bleached sulphate pulp, which is used today. An analysis of literary sources has revealed that the bleaching chromophore groups with hydrogen peroxide is the most promising method for the secondary fiber from waste paper grade MS-5B. This method is more environmentally friendly compared to others, since its use does not involve the inclusion of chlorine-containing reagents in the process and requires less energy costs due to the absence of delignification. The study established the optimal technological parameters for bleaching: hydrogen peroxide concentration – 30 %, bleaching duration – 60 min, process temperature – 70 °C. However, at these technological parameters the whiteness increased only from 23 to 36 % with an improvement of optical properties without a significant decrease in the physical and mechanical properties, because bleaching had almost no effect on the morphology of the fiber. Using more "rigid" technological parameters led to an increase in the whiteness from 23 to 50 %, but at the same time, the strength properties of the fibres noticeably decreased. The lignin content reduced after bleaching under "rigid" conditions using TCF technology.

**Keywords:** bleaching, secondary fiber, waste paper, hydrogen peroxide, liner with a white cover layer, white lined chipboard (WLC)

**For citation:** Lapaev F.V., Makhotina L.G. Technology for Bleaching Secondary Fiber from Waste Paper Grade MS-5B (Old Corrugated Cardboard, OCC). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 201–210. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-201-210>

### Введение

Мировое производство бумаги и картона с 2010 г. остается относительно стабильным, составляя в среднем около 400 млн т в год. Это связано с ростом потребления бумаги и картона в мире, в 2023 г. оно составило 420 млн т и, по прогнозам, продолжит расти в течение ближайшего десятилетия, достигнув 476 млн т к 2032 г. [19].

Наиболее массовыми видами продукции здесь являются тароупаковочные бумага, картон и бумага для печати. Следует отметить, что спрос на печатные виды бумаги падает и с 2015 г. их производство снижалось. Однако целлюлозно-бумажная промышленность продолжает развиваться благодаря растущему спросу на упаковку и средства гигиены на основе бумаги и картона [3, 18].

Упаковка остается крупнейшим сектором потребления бумаги и картона. По данным Euler Hermes, на долю картона к концу 2023 г. приходилось 2/3 мирового бумажного производства (до пандемии Covid-19 – только 1/2) [12]. Среднегодовое увеличение производства тароупаковочных бумаг и картонов составило 15,3 % – прогнозируется расширение рынка вторичного волокна из макулатуры [11, 17].

Макулатура представляет собой бывшие в употреблении изделия или печатную продукцию из бумаги и картона, а также отходы их производства и переработки [2, 10]. Основной причиной роста использования макулатуры становится экологическая политика. Ее цель – сохранение природных ресурсов, уменьшение количества твердых отходов.

Полезное использование макулатуры в России развивается стремительно [13]. Ряд исследователей работают в направлении вторичного использования макулатуры из белых сортов бумаги [6–8, 20].

В данной работе рассмотрена переработка макулатуры марки МС-5Б, которая применяется при изготовлении тароупаковочных видов бумаги и картона, например лайнера или коробочного картона, является отходом производства и потребления гофрированного и коробочного картонов, а также наиболее распространена среди всей собираемой макулатуры [1]. Согласно ГОСТ 10700–97, данная макулатура не должна содержать печатную краску, что исключает при переработке процесс деинкинга, одной из обязательных стадий которого является флотация. В настоящее время на гофроящики все чаще стали наносить печать методом флексографии с использованием 2–3 цветов. При флексографической печати применяют водно-спиртовые краски, которые легко удаляются при переработке макулатуры во вторичное волокно на стадии термодисперсионной обработки, и процесс деинкинга вновь не требуется, что входит в число преимуществ использования данного вида макулатуры.

Вторичное волокно из макулатуры марки МС-5Б обеспечивает высокие прочностные свойства готового продукта, однако поскольку эта марка макулатуры в основном состоит из отходов продукции, изготовленной из небеленых волокнистых полуфабрикатов, она имеет коричнево-желтый цвет. В связи с этим при производстве коробочного макулатурного картона WLC (white lined chipboard) для верхнего слоя приходится использовать беленую целлюлозу. Это приводит к необходимости установки линии по разволокнению и размолу беленой целлюлозы, что, в свою очередь, влечет повышение себестоимости продукции.

В настоящее время в России отбелке подвергают вторичное волокно из макулатуры, состоящей из белых и газетных видов бумаги, которое затем используют в основном при производстве санитарно-гигиенической продукции.

Цель данной работы – определить наиболее перспективные способы отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б для его дальнейшего использования при производстве коробочного картона в белом покровном слое взамен беленой сульфатной целлюлозы.

*Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования взяли вторичное волокно, полученное после переработки макулатуры марки МС-5Б на промышленной линии. Вторичное волокно отбирали из бассейна длинного волокна после его термодисперсионной обработки. Отливки, имитирующие верхний слой коробочного картона, массой  $70 \pm 3$  г/м<sup>2</sup> изготавливали на листоотливном аппарате Рапид-Кетен с автоматическим управлением. Перед изготовлением отливок размол не проводили.

В качестве отбеливающего реагента использовали пероксид водорода. Расход – 2,5 кг на 1 кг абсолютно сухого волокна. Отбелку проводили в термостойких стаканах с нагревом на электроплите с постоянным перемешиванием.

Отливки испытывали в соответствии со стандартными методами по ГОСТ. Исследовали влияние продолжительности и температуры процесса, концентрации пероксида водорода на оптические, печатные и физико-механические свойства вторичного волокна. Для определения морфологических характеристик волокна применяли анализатор Morph Compact. Образец пропускали через оптическую ячейку, позволяющую получить изображение волокон с высоким разрешением. Оптическая разрешающая способность составляет 10 мкм, рабочая разрешающая способность – 4 мкм благодаря обработке результатов. Метод дает возможность установить количество волокон в суспензии, их распределение в общей массе, арифметическую и взвешенную длину, ширину, количество мелочи по длине, по площади, индекс фибрилляции, а также грубость волокон, угол изгиба, скручиваемость, т. е. показатели, от которых зависят бумагообразующие свойства волокон.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Макулатура марки МС-5Б состоит из различных видов волокнистых полуфабрикатов: небеленой целлюлозы, полуцеллюлозы, различных видов древесной массы, вторичного волокна. Причем от партии к партии состав и процентное соотношение волокнистых полуфабрикатов меняются и не характеризуются стабильностью. Это создает проблемы в выборе химикатов и метода отбелки.

Отбелку вторичного волокна, состоящего преимущественно из целлюлозы, производят за счет делигнификации, используя химикаты, которые вступают в реакцию с хромофорными структурами волокнистого полуфабриката [3, 5, 15, 16]. Остаточный лигнин целлюлозных волокон имеет коричневатый цвет вследствие конденсации при глубокой химической переработке древесины. Конденсированный лигнин характеризуется наличием сопряженных структур, ароматических структур и двойных углерод-углеродных связей, карбонильных групп.

Волокна механической древесной массы содержат лигнин, который находится в неконденсированном состоянии и имеет хромофорные группы, образующиеся в результате окисления фенольных гидроксильных групп лигнина в хинонные в процессе производства этих волокнистых полуфабрикатов [9].

При содержании в макулатурной массе более 15–20 % волокон механической древесной массы использование отбеливающих реагентов, разрушающих лигнин, экономически нецелесообразно, т. к. при этом снижается выход волокнистого полуфабриката. При отбелке механической (древесной) массы основная цель – удаление только хромофоров – групп, придающих цвет [5].

Главное преимущество обесцвечивания состоит в полном исключении применения хлорсодержащих реагентов – метод, получивший в литературе название Total Chlorine Free, что благотворно влияет на экологическую составляющую процесса и готовой продукции. Данный вид отбеливания менее энергозатратный, т. к. не требуется удаление лигнина и гемицеллюлоз и за счет сохранения гемицеллюлоз уменьшается негативное влияние на физико-механические свойства волокна [14].

К недостаткам обесцвечивания в сравнении с делигнификацией можно отнести нестабильную белизну за счет того, что некоторые виды хромофоров после отбеливания реагентами могут снова окисляться и восстанавливать свою окраску, что приводит к пожелтению по истечении некоторого времени [10].

Для обесцвечивания вторичных волокон при переработке макулатуры из белых видов бумаги используют химикаты, обеспечивающие сохранение лигнина: пероксид водорода, дитионит натрия, формамидин сульфоновой кислоты [4].

В данной работе использовали пероксид водорода разной концентрации и исследовали влияние продолжительности (табл. 1) и температуры процесса отбеливания на оптические и физико-механические свойства, морфологию вторичного волокна.

Таблица 1

**Влияние продолжительности отбеливания на свойства вторичного волокна при концентрации пероксида водорода 37 % и температуре 90 °C**  
**Effect of bleaching duration on properties of secondary fiber, hydrogen peroxide concentration – 37 %, temperature – 90 °C**

Свойства	Продолжительность отбеливания, мин			
	0	50	60	80
<i>Оптические и печатные свойства</i>				
Белизна ISO, %	23	42	50	52
Цветовые координаты:				
<i>L</i> , %	64	79	83	83
<i>a</i>	4,7	1,4	0,4	0,3
<i>b</i>	15,8	15,4	11,7	11,0
Шероховатость, мл/мин	880	530	1031	1971
Воздухопроницаемость, мл/мин	1263	1587	4374	4520
<i>Физико-механические свойства</i>				
Разрывная длина, км	4,0	3,8	2,5	1,7
Сопротивление разрыву, Н/м	2726	2573	1690	1154
Сопротивление раздиранью, мН	366	196	273	318
Сопротивление продавливанию, кПа	184	170	99	73
<i>Морфологические свойства</i>				
Средневзвешенная длина, мм	1,14	1,06	1,05	1,05
Ширина, мкм	24,9	24,1	24,0	23,9
Грубость, мг/м	0,12	0,35	0,24	0,24
Изогнутые волокна, %	21	49	46	48
Скручиваемость, %	6,8	11,6	11,2	12,0
Степень фибрилляции, %	0,8	0,6	0,6	0,6
Содержание мелочи, %	14	13	12	12

Примечание: *L*, *a*, *b* – цветовые координаты: переход от черного к белому, от красного к зеленому и от желтого к синему соответственно.

Показано, что при повышении продолжительности отбелки до 60 мин белизна увеличивается с 23 до 50 % (понижается значение цветовой координаты – перехода от желтого к синему), шероховатость и воздухопроницаемость также становятся больше. При дальнейшем росте продолжительности процесса до 80 мин оптические свойства, шероховатость и воздухопроницаемость изменяются незначительно. При увеличении продолжительности отбелки ощутимо снижаются показатели, которые в большей степени зависят от сил межволоконных связей (разрывная длина, сопротивление разрыву и продавливанию), чем от длины волокна (сопротивление раздиранию). Это связано с тем, что длина и ширина волокна почти не изменяются, а степень фибрилляции и содержание мелочи, в большой степени определяющие связеобразование, снижаются при увеличении грубости, скручиваемости и изогнутости волокон.

Результаты исследования влияния концентрации пероксида водорода на оптические и физико-механические свойства и морфологию вторичного волокна представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние концентрации пероксида водорода на свойства вторичного волокна при продолжительности отбелки 60 мин и температуре 90 °С**  
**Effect of hydrogen peroxide concentration on the properties of secondary fiber, bleaching duration – 60 min, temperature – 90 °С**

Свойства	Небеленое вторичное волокно	Концентрация H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , %	
		30	37
<i>Оптические и печатные свойства</i>			
Белизна ISO, %	23	38	50
Цветовые координаты:			
<i>L</i> , %	64,0	76,6	83,0
<i>a</i>	4,7	2,0	0,4
<i>b</i>	15,8	15,8	11,7
Шероховатость, мл/мин	880	1071	1031
Воздухопроницаемость, мл/мин	1263	2393	4374
<i>Физико-механические свойства</i>			
Разрывная длина, км	4,0	3,2	2,5
Сопротивление разрыву, Н/м	2726	2193	1690
Сопротивление раздиранию, мН	366	375	273
Сопротивление продавливанию, кПа	184	148	99
<i>Морфологические свойства</i>			
Средневзвешенная длина, мм	1,14	1,13	1,11
Ширина, мкм	24,9	24,5	24,1
Грубость, мг/м	0,12	0,26	0,24
Изогнутые волокна, %	2	29	46
Скручиваемость, %	6,8	7,7	11,2
Степень фибрилляции, %	0,8	0,6	0,6
Содержание мелочи, %	14	15	12

Использование пероксида водорода с концентрацией 30 % в меньшей степени приводит к снижению физико-механических свойств вторичного волокна,

т. к. практически не оказывает влияние на морфологию, однако белизна увеличивается только с 23 до 38 %.

Зависимость свойств вторичного волокна от температуры отбелки при использовании пероксида водорода с концентрацией 30 % и продолжительности процесса 60 мин показана в табл. 3.

Таблица 3

**Влияние температуры процесса на свойства вторичного волокна при продолжительности отбелки 60 мин и концентрации пероксида водорода 30 %**  
**Effect of bleaching temperature on the properties of secondary fiber, bleaching duration – 60 min, hydrogen peroxide concentration – 30 %**

Свойства	Небеленое вторичное волокно	Температура, °С	
		70	90
<i>Оптические и печатные свойства</i>			
Цветовые координаты: <i>L</i> , %	64	76	77
<i>a</i>	4,7	2,7	2,0
<i>b</i>	15,8	16,8	15,8
Белизна ISO, %	23	36	38
Шероховатость, мл/мин	880	1051	1071
Воздухопроницаемость, мл/мин	1263	1814	2393
<i>Физико-механические свойства</i>			
Разрывная длина, км	4,0	3,7	3,2
Сопротивление разрыву, Н/м	2726	2556	2193
Сопротивление раздиранью, мН	366	377	375
Сопротивление продавливанию, кПа	184	166	148
<i>Морфологические свойства</i>			
Средневзвешенная длина, мм	1,14	1,10	1,11
Ширина, мкм	24,9	24,0	24,1
Грубость, мг/м	0,12	0,24	0,26
Изогнутые волокна, %	21	25	29
Скручиваемость, %	6,8	7,1	7,7
Степень фибрилляции, %	0,8	0,7	0,6
Содержание мелочи, %	14	13	15

Проведение отбелки при более «мягких» условиях при концентрации пероксида водорода 30 % и температуре процесса 70 °С в меньшей степени способствует снижению сопротивления разрыву и продавливанию, чем при температуре 90 °С, поскольку морфологические показатели, определяющие прочность бумагообразующих связей, практически не изменяются. Однако белизна повышается лишь с 23 до 36 %. В случае роста температуры с 70 до 90 °С увеличение белизны составляет только 2 %.

Проведение процесса отбелки в «жестких» условиях приводит к тому, что длина и ширина волокна изменяются незначительно, что оказывает благоприятное влияние на сопротивление раздиранью. Однако термоокислительная деструкция фибрилл, находящихся на поверхности волокон (снижение степени фибрилляции), и мелкого волокна (снижение содержания мелочи) приводит к ухудшению связеобразования между волокнами и повышению воздухопроницаемости. Потеря гемицеллюлоз уменьшает способ-

ность к адгезии в точках контакта и приводит к появлению дополнительных водородных связей. Все это обуславливает ухудшение бумагообразующих свойств и снижение прочности волокон при одновременном повышении белизны с 23 до 50 %.

Отбелка химико-термомеханической массы при использовании пероксида водорода осуществляется в основном за счет удаления только хромофорных групп с сохранением лигнина [4, 5].

Определение содержания лигнина гидролизом волокна смесью серной и фосфорной кислот, предварительно подвергнутого экстракции хлористым метиленом (по ГОСТ 11960–79), показало, что содержание лигнина в небеленом волокне составляет 26 %, после отбелки в жестких условиях – 6 %.

Вероятно, во вторичном волокне, особенно после термодисперсионной обработки, помимо удаления хромофорных групп пероксид водорода также окисляет карбоксильные и бензильные спиртовые группы в лигнине и частично их деструктурирует, особенно при высокой температуре отбелки и большой продолжительности процесса.

#### Заключение

Показана возможность отбелки вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б. На основании анализа научной литературы установлено, что наиболее перспективным является отбелка по методу Total Chlorine Free – с полным исключением из процесса хлорсодержащих реагентов.

Определены технологические параметры отбелки пероксидом водорода, при которых сохраняются высокие физико-механические свойства волокна: концентрация  $H_2O_2$  – 30 %, продолжительность процесса – 60 мин, его температура – 70 °С. При данных технологических параметрах удалось повысить белизну ISO только с 23 до 36 %.

Далее будет исследована возможность повышения белизны вторичного волокна из макулатуры марки МС-5Б за счет использования стабилизаторов, комплексообразователей, предотвращающих разложение пероксида водорода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анализ современных стратегий переработки макулатуры // Объединенные бумажные фабрики. Режим доступа: <https://ukobf.com/expertise/analytics/Analiz-sovremennykh-strategiy-pererabotki-makulatury.html> (дата обращения: 14.11.25).

Analysis of Modern Waste Paper Recycling Strategies. *Obyedinenniye bumazhniye fabriki* = The Consolidated Paper Mills Company. (In Russ.).

2. Ванчаков М.В. Технология и оборудование переработки макулатуры: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. 107 с.

Vanchakov M.V. *Waste Paper Processing Technology and Equipment*: in 3 parts. Part 1. St. Petersburg, HSTE SPbSUITD Publ., 2019. 107 p. (In Russ.).

3. Ванчаков М.В. Технология и оборудование переработки макулатуры: в 3 ч. Ч. 3. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. 139 с.

Vanchakov M.V. *Waste Paper Processing Technology and Equipment*. Part 3. St. Petersburg, HSTE SPbSUITD Publ., 2019. 139 p. (In Russ.).

4. Ишкватова А.Р., Ивановский С.К., Трифонова К.В. Влияние процесса отбелки на прочностные свойства бумаги // Междунар. журн. прикладн. и фундамент. исслед. 2014. № 12. С. 22–24.

Ishkuvatova A.R., Ivanovsky S.K., Trifonova K.V. Influence of Process of the Bleaching on Strength Properties of Paper. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research, 2014, no. 12, pp. 22–24. (In Russ.).

5. Ковалева О.П. Ресурсосберегающая технология переработки макулатуры. Ч. 12. Отбелка макулатурной массы: основные положения // Леспроминформ. 2008. № 3(52). С. 126–132.

Kovaleva O.P. Resource-Saving Waste Paper Recycling Technology. Part 12. Bleaching of Waste Paper: the Main Provisions. *Lesprominform*, 2008, no. 3, pp. 126–132. (In Russ.).

6. Мидуков Н.П. Ресурсосберегающая технология тест-лайнера с белым покрытием: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2020. 304 с.

Midukov N.P. *Resource-Saving Technology of Test Liner with White Cover Layer*: Doct. Techn. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2020. 304 p. (In Russ.).

7. Мидукова М.А., Смирнова Е.Г., Смолин А.С. Совершенствование технологии флотации макулатуры из офисной бумаги // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2022. Вып. 238. С. 267–275.

Midukova M.A., Smirnova E.G., Smolin A.S. Improving the Technology of Flotation of Waste Paper from Office Paper. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* = News of the St. Petersburg Forestry Academy, 2022, no. 238, pp. 267–275. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.267-275>

8. Муллина Э.Р., Мишурина О.А., Нигматуллина Л.И., Ишкuvatова А.Р. К вопросу облагораживания макулатурной массы при производстве упаковочных материалов // Междунар. журн. прикладн. и фундамент. исслед. 2015. № 3-3. С. 316–318.

Mullina E.R., Mishurina O.A., Nigmatullina L.I., Ishkuvatova A.R. To the Question of Refining Waste Paper in the Production of Packaging Materials. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research, 2015, no. 3, pp. 316–318. (In Russ.).

9. Муллина Э.Р., Чупрова Л.В., Ершова О.В., Лыгина Е.Г., Корниенко Н.Д., Пинчукова К.В. Влияние химической природы отбеливающих реагентов на свойства целлюлозного волокна // Успехи соврем. естествознания. 2015. № 11. С. 74–77.

Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Lygina E.G., Kornienko N.D., Pinchukova K.V. Influence of the Chemical Nature of the Bleaching Reagents on Properties of Cellulose Fibre. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2015, no. 11, pp. 74–77. (In Russ.).

10. Пузырев С.С., Ковалева О.П., Цветкова Г.Н. Переработка макулатуры. СПб: СПбГЛТА, 2003. 43 с.

Puzirev S.S., Kovaliva O.P., Tsvetkova G.N. *Waste paper recycling*. St. Petersburg. SPbGLTA Publ., 2003. 43 p. (In Russ.).

11. Рынок макулатуры марки МС-5Б, тарных картонов и гофропродукции в России // ООО «Центр Системных Решений». Режим доступа: <https://www.liga-pm.ru/upload/iblock/bcc/05v08y3ys591cp77hxayqogf5b5cpsydp.pdf> (дата обращения: 16.02.25).

MS-5B brand waste paper, containerboards and corrugated products market in Russia. ООО *Centr Sistemnikh Rescheniy* = System Solutions Center LLC. (In Russ.).

12. Ситуация в мировой отрасли по производству бумаги и картона возвращается в нормальное русло. Euler Hermes, 2021. Режим доступа: <https://proderevo.net/industries/pulp-and-paper-industry/situatsiya-v-mirovoj-otrasli-po-proizvodstvu-bumagi-i-kartona-vozvrashchaetsya-v-normalnoe-ruslo.html?ysclid=m784kv8zo5119217437> (дата обращения: 17.02.25).

*The Situation in the Global Paper and Cardboard Industry is Returning to Normal*. Euler Hermes, 2021. (In Russ.).

13. Смолин А.С. О развитии технологии бумаги и картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 163–171.

Smolin A.S. *On the development of paper and cardboard technology. Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 2, pp. 163–171. (In Russ.).

14. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 1, ч. 3. Сырье и производство полуфабрикатов / гл. ред. П.С. Осипов. СПб.: Политехника, 2004. 316 с.

*Technology of Pulp and Paper Production. In 3 vol. Vol. 1. Part 3. Production of Semi-Finished Products. Part 3. Raw materials and Semi-Finished Products.* St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2004. 316 p. (In Russ.).

15. Danielewicz D., Surma-Ślusarska B. Pulping and Bleaching OCC. Part II. Oxygen Delignification and Bleaching, *Appita Journal*, 2011, no. 64(1), pp. 66–72.

16. Dollie L., Mortha G. Bleached Pulp Production from Old Corrugated Cardboards – Kraft Cooking of Fiber Mixtures Modeling Cardboards. *Cellulose Materials Doctoral Students Conference 2017*. 2017, pp. 7–10.

17. Forest Products Annual Market Review 2023–2024, United Nations and the Food and Agriculture Organization of the United Nations [https://unece.org/sites/default/files/2024-11/2413966E\\_FPAMR24\\_WEB.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2024-11/2413966E_FPAMR24_WEB.pdf)

18. Key Statistics, 2023, European Pulp & Paper Industry. Available at: <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2024/09/Key-Statistics-2023-FINAL-2.pdf> (accessed 02.02.25).

19. Production Volume of Paper and Paperboard Worldwide from 1961 to 2023. Available at: <https://www.statista.com/statistics/270314/global-paper-and-cardboard-production/> (accessed 02.02.25).

20. Ventorim G., Colodette J.L., Costa M.M. da, ECF and TCF Bleaching of Secondary Fiber Pulp. *Ciência Florestal*, 2009, vol. 9, pp. 41–54. <https://doi.org/10.5902/19805098383>

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