

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

2

2025

## **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)  
**АНГЕЛЬСТА М.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)  
**Богданович Н.И.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**Буй Тэ Дой**, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)  
**Ван Хайнинген А.**, д-р наук, проф. (США, Ороно)  
**Воронин А.В.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)  
**Гаврилова О.И.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)  
**Ефремова С.В.**, д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)  
**Залесов С.В.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)  
**Кожухов Н.И.**, д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)  
**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

2

2025

## **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)  
**Bogdanovich N.I.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Bui The Doi**, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)  
**Van Heiningen A.**, PhD, Prof. (USA, Orono)  
**Voronin A.V.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)  
**Gavrilova O.I.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)  
**Efremova S.V.**, Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)  
**Zalesov S.V.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)  
**Kozhukhov N.I.**, Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)  
**Kononov 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>Н.Ф. Каплина.</i> Вековые циклы радиального прироста и жизненного состояния дуба черешчатого в дубравах южной лесостепи .....	9
<i>В.П. Коба, О.О. Коренькова, Н.А. Макаров.</i> Жизнеспособность пыльцы природных популяций <i>Pinus brutia</i> var. <i>pityusa</i> (Steven) Silba Горного Крыма .....	24
<i>Г.Э. Рего, О.И. Григорьева, И.В. Григорьев, А.М. Воронова, И.С. Должиков, В.П. Друзьянова.</i> Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода .....	38
<i>Р.Р. Султанова, Р.Р. Байтурина, С.В. Диарова.</i> Оценка трансформации лесов Южного Урала по разновременным космическим снимкам....	51
<i>Ю.Д. Иванова, А.В. Ковалев, В.Г. Суховольский.</i> Фитомасса фракций деревьев по модели рангового распределения.....	63
<i>А.П. Тюрин.</i> Динамика изменения лесопожарной опасности в Удмуртской Республике.....	76
<i>Р.Х. Пшегусов, В.А. Чадаева.</i> Пространственное распределение сосновых лесов Кавказа .....	92
<i>Т.А. Москалюк, Е.Н. Репин.</i> Эколого-ценотическая структура реликтовой рощи сосны погребальной ( <i>Pinus × funebris</i> Kom.) в Приморском крае.....	112

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
 ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

<i>А.В. Солдатов, Э.Ф. Герц, А.В. Мехренцев, А.Ф. Уразова.</i> Обоснование сырьевого обеспечения лесопромышленного предприятия .....	128
<i>А.С. Королев, Е.С. Шаранов, О.С. Егошин.</i> Определение скрытых дефектов в перекрестноклееных плитах из древесины сосны ( <i>Pinus sylvestris</i> L.).....	143
<i>О.Р. Sushko, М.У. Efimova.</i> Analysis of the Timber Industry Complex of Forest-Rich Countries .....	154

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ  
 И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

<i>М. Aydın, М.Е. Kara, О. Çamlıbel.</i> Influence of Décor and Overlay Paper Mass on Laminate Floor Product Properties .....	172
---	-----

- С.Н. Казин, Д.В. Василишин, А.В. Шишарева, В.Д. Ворончихин, А.А. Тамби.* Физико-механические свойства композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы ..... 183

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- С.В. Попова, Р.Н. Матвеева.* Изменчивость показателей шишек и семян кедрового корейского в условиях интродукции ..... 200
- С.В. Конев, Хасан Алабдуллахалхасно.* Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем... 210



## CONTENTS

## FORESTRY

- N.F. Kaplina.* Secular Cycles of Radial Increment and Vitality of English Oak in the Oak Groves of the Southern Forest-Steppe ..... 9
- V.P. Koba, O.O. Korenkova, N.A. Makarov.* The Viability of Pollen from Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in the Mountainous Crimea ..... 24
- G.E. Rego, O.I. Grigoreva, I.V. Grigorev, A.M. Voronova, I.S. Dolzhikov, V.P. Druzyanova.* A Mathematical Model of Tree Selection in a Homogeneous Plantation during Improvement Thinning ..... 38
- R.R. Sultanova, R.R. Baiturina, S.V. Diarova.* Assessment of the Transformation of Forests in the Southern Urals Based on Multi-Temporal Satellite Images ..... 51
- Yu.D. Ivanova, A.V. Kovalev, V.G. Soukhovolsky.* Phytomass of Tree Fractions According to the Rank Distribution Model ..... 63
- A.P. Tyurin.* The Dynamics of Forest Fire Hazard Changes in the Udmurt Republic ..... 76
- R.Kh. Pshegusov, V.A. Chadaeva.* Spatial Distribution of Pine Forests in the Caucasus ..... 92
- T.A. Moskaliuk, E.N. Repin.* Ecological-Cenotic Structure of the Relict Japanese Pine (*Pinus × funebris* Kom.) Grove in the Primorski Territory ..... 112

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT  
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

- A.V. Soldatov, E.F. Gerts, A.V. Mekhrentsev, A.F. Urazova.* Justification of Raw Material Supply for a Timber Industry Enterprise ..... 128
- A.S. Korolev, E.S. Sharapov, O.S. Egoshin.* Detection of Hidden Defects in Cross-Laminated Pine (*Pinus sylvestris* L.) Panels ..... 143
- O.P. Sushko, M.V. Efimova.* Analysis of the Timber Industry Complex of Forest-Rich Countries ..... 154

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

- M. Aydin, M.E. Kara, O. Çamlıbel.* Influence of Décor and Overlay Paper Mass on Laminate Floor Product Properties ..... 172

---

<i>S.N. Kazitsin, D.V. Vasilishin, A.V. Shishmareva, V.D. Voronchikhin, A.A. Tambi. Physical and Mechanical Properties of Composite Materials Based on Cellulose Diacetate .....</i>	183
--	-----

*BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE*

<i>S.V. Popova, R.N. Matveeva. Variability of Korean Pine Cone and Seedling Parameters under the Conditions of Introduction.....</i>	200
<i>S.V. Koptev, H. Alabdullahalhasno. Applying the Random Forest Algorithm to Analyze the Dynamics of Taiga-Tundra Forest Ecosystems .....</i>	210



Научная статья

УДК 630\*181.71:630\*811.4:630\*561.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-9-23

## Вековые циклы радиального прироста и жизненного состояния дуба черешчатого в дубравах южной лесостепи

*Н.Ф. Каплина, канд. биол. наук; ResearcherID: [L-9480-2013](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-700X>*

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, п/о Успенское, Московская обл., Россия, 143030; [kaplina@inbox.ru](mailto:kaplina@inbox.ru)

---

*Поступила в редакцию 30.08.23 / Одобрена после рецензирования 23.11.23 / Принята к печати 25.11.23*

---

**Аннотация.** Радиальный прирост ствола старовозрастных деревьев дуба черешчатого может быть источником информации об их росте и развитии на заключительном этапе жизни и о потенциале долговечности. Цель исследования – оценка жизненного состояния дуба в онтогенезе на основе анализа вековой цикличности радиального прироста ствола. Объекты – группы деревьев, различающихся по динамике развития кроны, в 90- и 270-летних нагорных и 130- и 230-летних пойменных дубравах Теллермановского опытного лесничества РАН. Приросты измерены по изображениям кернов ствола, отсканированных при разрешении 1200 dpi. Жизненное состояние дуба характеризовали по приросту ранней древесины и его связи с развитием кроны. Выделены вековые циклы радиального прироста, обусловленные развитием и самоизреживанием древостоев. В нагорных дубравах, возобновившихся на вырубках, 1-я ветвь цикла – нисходящая, в пойменных, начавших рост под пологом, – восходящая. Первая ветвь векового цикла продолжается до возраста дуба 150–170 лет, 2-я – до 200–250 лет. Коэффициенты вариации радиального прироста ранней и поздней древесины изменяются в пределах соответственно 15–37 и 34–75 % и в значительной мере зависят от вековой цикличности. Полученные результаты свидетельствуют о приоритете развития кроны над ростом ствола в динамике векового цикла. Так, на нисходящих ветвях циклов относительное снижение прироста поздней древесины значительно больше, чем ранней – в 1,2–3,8 раза, а на восходящих его относительное увеличение выше только в 1,0–1,7 раза. При переходе от 1-й ко 2-й ветви векового цикла средний прирост ранней древесины в превосходящем количестве случаев увеличился, а соотношение среднего прироста поздней и ранней древесины снизилось. В вековом цикле максимальное изменение прироста ранней древесины равняется ширине 1 ряда сосудов. Современное жизненное состояние изученных старовозрастных дубов оценено как удовлетворительное. В условиях меньшего поражения гнилями долговечность дуба черешчатого могла бы быть значительно выше.

**Ключевые слова:** дуб черешчатый, прирост ранней древесины, прирост поздней древесины, прирост ствола, вековая цикличность, развитие кроны, жизненное состояние, долговечность

*Для цитирования:* Каплина Н.Ф. Вековые циклы радиального прироста и жизненного состояния дуба черешчатого в дубравах южной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 9–23. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-9-23>

Original article

## Secular Cycles of Radial Increment and Vitality of English Oak in the Oak Groves of the Southern Forest-Steppe

*Natalia F. Kaplina, Candidate of Biology; ResearcherID: [L-9480-2013](https://orcid.org/0000-0001-5999-700X),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-700X>*

Institute of Forest Science Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, Uspenskoe Village, Moscow Region, 143030, Russian Federation; [kaplina@inbox.ru](mailto:kaplina@inbox.ru)

---

*Received on August 30, 2023 / Approved after reviewing on November 23, 2023 / Accepted on November 25, 2023*

---

**Abstract.** Radial increment of the stem of old-growth English oak trees can be a source of information about their growth and development at the final stage of life and longevity potential. The aim of the study has been to assess the vitality of oak during ontogenesis based on the analysis of the secular cyclicity of the radial stem increment. The objects have been groups of trees differing in crown development dynamics in 90- and 270-year-old upland and 130- and 230-year-old floodplain oak groves of the Tellerman Experimental Forestry of the RAS. The increments have been measured from the images of stem core samples scanned at 1200 dpi. The vitality of the oak has been assessed by the early wood increment and its relationship with the crown development. The secular cycles of radial increment caused by the development and self-thinning of stands have been identified. In upland oak groves that have regenerated in clearings, the first branch of the cycle is descending, in floodplain oak groves that have begun to grow under the canopy, it is ascending. The first branch of the secular cycle continues until the age of the oak tree is 150–170 years, the second – up to 200–250 years. The coefficients of variation of the early and late wood radial increment vary within the range of 15–37 and 34–75 %, respectively, and largely depend on secular cyclicity. The results obtained indicate the priority of crown development over stem growth in the dynamics of the secular cycle. Thus, on the descending branches of the cycles, the relative decrease in the late wood increment is significantly greater than that of the early wood – by 1.2–3.8 times, while on the ascending branches its relative increase is only 1.0–1.7 times higher. During the transition from the 1st to the 2nd branch of the secular cycle, the average early wood increment has increased in the overwhelming majority of cases, while the ratio of the average late and early wood increment has decreased. In a secular cycle, the maximum variation in the early wood increment has been equal to the width of a row of vessels. The current vitality of the studied old-growth oak trees has been assessed as satisfactory. Under conditions of lesser rot damage, the longevity of the English oak could have been much higher.

**Keywords:** English oak, early wood increment, late wood increment, stem increment, secular cyclicity, crown development, vitality, longevity

**For citation:** Kaplina N.F. Secular Cycles of Radial Increment and Vitality of English Oak in the Oak Groves of the Southern Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 9–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-9-23>

### *Введение*

Старовозрастные лесостепные дубравы – уникальные памятники природы, сохранившиеся благодаря семенному происхождению, благоприятным лесорастительным условиям и охранному режиму. В настоящее время они сильно ослаблены и достигли предельного возраста существования [12].

Изучение роста и развития дубрав обычно ограничивается возрастом спелости. Между тем анализ радиального прироста старовозрастных деревьев позволяет изучить рост и развитие дуба черешчатого на заключительном этапе онтогенеза и оценить потенциал его долговечности.

Динамика жизненности деревьев помимо кратковременных включает и долговременные изменения [1, 16]. В предыдущей работе обосновано представление о жизненном состоянии дерева как совокупности долго-, средне- и кратковременной составляющих (по длительности восстановления скелетных осей кроны, осей ветвления, облиственных побегов). Их индикаторами служат соответствующие циклы прироста ранней древесины (РД) ствола [7] – показателя, отражающего развитие кроны дуба [5].

Цель исследования – оценка жизненного состояния дуба черешчатого на различных этапах его онтогенеза на основе анализа вековой цикличности радиального прироста РД и поздней (ПД) древесины ствола в старовозрастных и более молодых нагорных и пойменных дубравах на южной границе лесостепи России.

### *Объекты и методы исследования*

Исследование проведено в дубравах Теллермановского опытного лесничества, расположенного на южной границе лесостепи России.

Нагорные снытево-осоковые дубравы преимущественно семенного происхождения сформированы дубом поздней феноформы, I класса бонитета:

старовозрастная дубрава естественного происхождения (кв. 15, 51°21'3" с. ш. 41°57'49" в. д.). Изученные деревья дуба относятся к одному поколению, возобновившемуся около 1750 г.;

культуры дуба 90-летнего возраста, созданные в 1932 г. посевом на вырубке (кв. 6, 51°20'53" с. ш. 41°58'35" в. д.).

Пойменные ландышево-ежевичные дубравы естественного, преимущественно семенного происхождения сформированы дубом ранней феноформы, II класса бонитета:

старовозрастная дубрава (51°20'00" с. ш. 41°59'01" в. д.). Исследованные деревья относятся к одному поколению, возобновившемуся около 1790 г.;

дубрава 130-летнего возраста, возобновившаяся около 1890 г. (кв. 47, 51°19'28" с. ш. 41°58'23" в. д.).

Исходные временные ряды прироста РД и ПД и его 7–60-летняя цикличность в 90-летней нагорной и 130-летней пойменной дубравах описаны в [6, 7].

В старовозрастных дубравах отобраны керны без гнилей, включающие приросты от камбия до сердцевины ствола на высоте 1,3 м: в нагорной 270-летней дубраве у 9 деревьев дуба II–III классов роста и развития по Крафту, в пойменной 230-летней – у 3 дубов II класса. В 90-летней нагорной и 130-летней пойменной дубравах использовали ранее полученные данные по радиальному приросту 3 групп деревьев (по 10 деревьев в группе) соответственно I–II, III и IV классов.

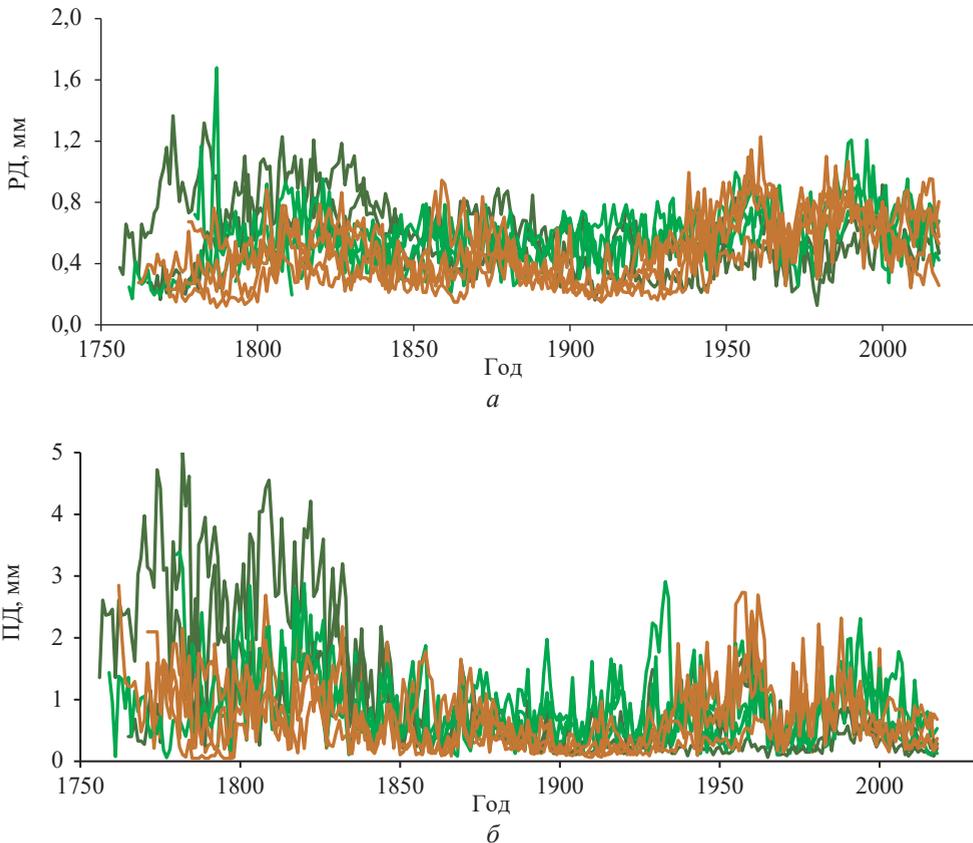
Керны в сырораствующем состоянии либо после выдерживания в воде не менее 1 часа (до постоянных размеров радиального прироста) обработаны лезвием и отсканированы при разрешении 1200 dpi (размер пикселя  $\approx 0,02$  мм). Ширину приростов измеряли с помощью компьютерной программы GetData Graph Digitizer 2.24. Перекрестное датирование проводили визуальное по приросту ПД, поскольку для объектов исследования характерна его высокая синхронность у деревьев всех классов роста и развития, выпадения годичных колец не зафиксировано.

Для вычислений использовали программные пакеты Excel и Statistica. Различия древостоев и групп деревьев по параметрам векового цикла оценивали с помощью дисперсионного анализа на уровне  $\alpha = 0,05$ .

Жизненное состояние дуба в вековой динамике определяли по развитию кроны. Отмечали 3 типа развития кроны в соответствии с оригинальной методикой [8], которые идентифицировали по ширине прироста РД [5]: деревья лучшего развития – раскидистого типа кроны (Р) – имеют ширину годичного кольца РД более 0,8 мм; деревья зонтиковидного типа (З) – 0,4–0,8 мм; узкокромного типа (У) – до 0,4 мм.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Прирост ПД вносит наибольший вклад в рост ствола дерева, в то время как прирост РД обуславливает развитие кроны. Исходные временные ряды развития РД и ПД старовозрастных деревьев дуба представлены на рис. 1.



Окончание рис. 1

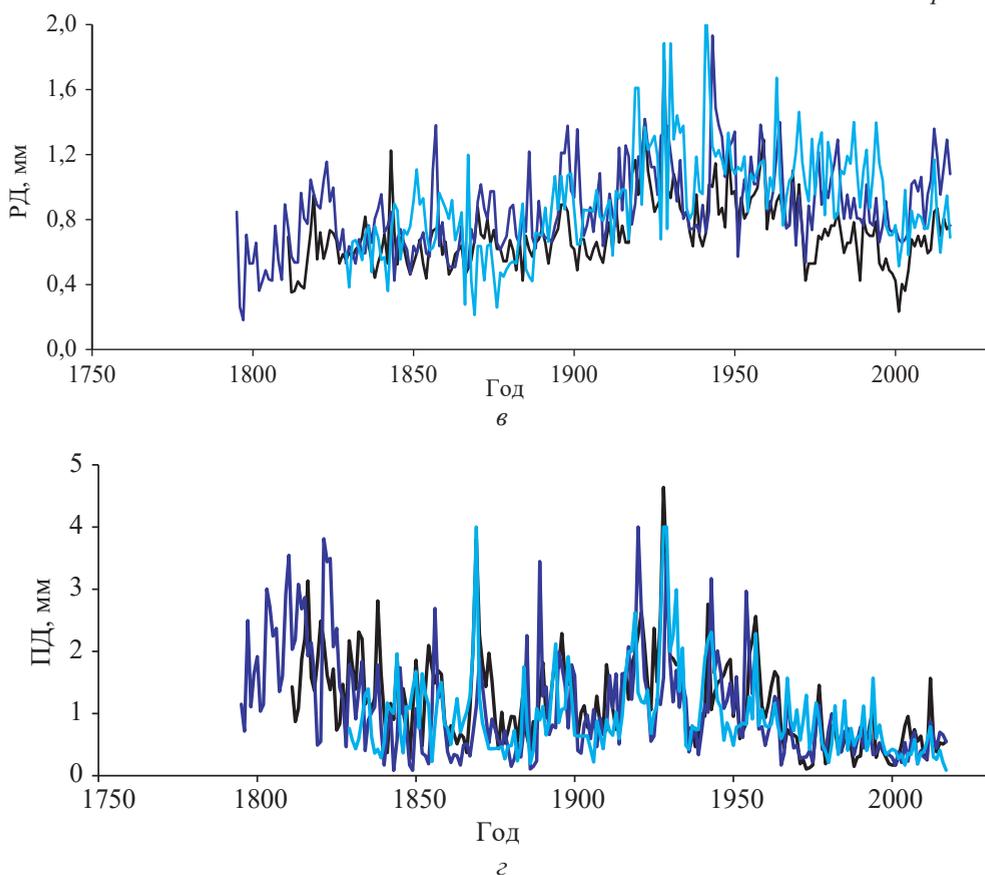


Рис. 1. Временные ряды радиального прироста РД (а, в) и ПД (б, г) деревьев в старовозрастных нагорной (а, б) и пойменной (в, г) дубравах

Fig. 1. The time series of early wood (а, в) and late wood (б, г) radial increment in old-growth upland (а, б) and floodplain (в, г) oak groves

В 270-летней дубраве динамика радиального прироста РД и ПД включает 2 максимума и минимум между ними продолжительностью по несколько 10-летий. Первый максимум более выражен в приросте ПД. Последующее почти 100-летнее снижение прироста закономерно для деревьев (возрастной тренд) вследствие как апикального доминирования во время быстрого роста, так и конкурентных отношений. Для дуба на открытом месте свойствен менее выраженный возрастной тренд [22]. Кроме того, многолетнее снижение прироста очевидно усилилось с середины XIX в. в связи с повышением сухости климата [10], массовое отмирание дубрав с 90-х гг. XIX в. продолжалось около 20 лет [2]. Второй максимум более выражен в приросте РД и обусловлен завершением роста по высоте и развитием крон в разреженном пологе. Период массового усыхания дуба с конца 60-х гг. XX в. не прервал вековую динамику прироста, но, возможно, ослабил его.

В пойменном древостое 1-й максимум отмечен только в приросте ПД, и он значительно менее продолжительный, чем в нагорной дубраве. Увеличение прироста РД и ПД начинается после 90-летнего возраста, причем оно более выражено по сравнению со 2-м максимумом в нагорной дубраве.

Различия вековой динамики прироста нагорных и пойменных дубрав объясняются условиями их начального роста. Нагорные древостои возобновлялись на вырубках [14], пойменные – под пологом предыдущего поколения дуба [3]. Известно, что длинноволновые колебания прироста могут отражать колебания плотности древостоев, вызванные как естественными причинами, в т. ч. сменой поколений, так и рубками [3, 15, 18, 19, 21, 22]. Очевидно, что причинами выявленных вековых циклов в дубравах являются а) характер роста и развития – быстрый рост по высоте на 1-й ветви цикла, снижение его интенсивности в середине и завершение на 2-й ветви и б) конкурентные отношения и самоизреживание в поколениях и между ними.

В 270-летней нагорной дубраве выделено 3 группы деревьев (рис. 1, а, б): с приростом в первые 80 лет жизни выше среднего (темно-зеленые линии), средним (светло-зеленые) и ниже среднего (коричневые линии). В 230-летней пойменной дубраве деревья объединены в одну группу. Характеристики групп приведены в табл. 1, группы обозначены по первым буквам типов развития крон в экстремумах векового цикла. Временные ряды прироста получали как средние по деревьям, диаметр ствола без коры – как удвоенную сумму годовичных приростов.

Таблица 1

**Характеристики изученных групп деревьев дуба**  
**The characteristics of the studied oak tree groups**

Дубравы	Возраст, лет	Группа деревьев	Число деревьев в группе	Средний диаметр без коры, см	
				в возрасте 80 лет	в 2014–2017 гг.
Нагорные	270	P–3–3	2	44	84
		3–3–3	3	27	78
		3–У–3	4	19	60
	90	P–P	10	42	42
		P–3	10	32	32
		3–У	10	23	23
Пойменные	230	3–P–P	3	35	87
	130	P3–P	10	35	52
		3–3	10	27	39
		У–3	10	22	33

В самых старых и более молодых дубравах средние диаметры ствола в группах деревьев сходного развития в 80-летнем возрасте довольно близки. В 230- и 130-летних пойменных дубравах, начавших рост под пологом прежнего поколения, средние диаметры групп быстрого развития ниже, чем в нагорных дубравах. Последующее увеличение радиального прироста в вековом цикле в 230-летней пойменной дубраве позволило улучшить развитие крон деревьев в ней и сравняться по диаметру ствола с группой 270-летних нагорных деревьев наибольшего диаметра.

Анализ временных рядов прироста проводили начиная с возраста дерева, в котором сосуды РД и ее прирост увеличиваются до размеров, характерных для зрелой древесины [17]. Этот возраст в данной работе принят равным 30 годам в нагорных и 40 годам – в пойменных дубравах.

В старовозрастных дубравах предварительную оценку параметров векового цикла прироста РД и ПД получали по уравнению

$$y = a + bx + A \sin \frac{2\pi(x - c)}{T},$$

где  $y$  – радиальный прирост;  $x$  – календарный год;  $a$  и  $b$  – коэффициенты линейного тренда;  $A$ ,  $c$  и  $T$  – амплитуда, начальная фаза и период векового цикла соответственно.

Коэффициент  $b$  оказался статистически значимым в большинстве случаев, это отражает, по нашему мнению, не наличие тренда, а различие параметров ветвей векового цикла, что обусловлено разницей их факторов и механизмов. С целью анализа этих вариаций аппроксимацию вековой динамики проводили без использования тренда, получая параметры каждой ветви цикла отдельно по уравнению

$$y = y_0 + A \sin \frac{2\pi(x - c)}{T},$$

где  $y_0$  – радиальный прирост при нулевой синусоиде (равна среднему приросту ветви цикла).

Параметры ветвей векового цикла в старовозрастных дубравах оценивали на перекрывающихся отрезках временных рядов, включающих области максимума и минимума цикла, длину отрезков находили, увеличивая их до получения статистически значимых параметров цикла. Для уточнения параметров на концах временного ряда в уравнение включали 2-ю синусоиду с периодом, следующим по продолжительности после векового (около 30–60 лет).

В нагорной 90-летней и пойменной 130-летней дубравах вековой цикл представлен 1 ветвью, причем минимум прироста в нагорной и максимум в пойменной, возможно, еще не достигнуты (рис. 2). Параметры векового цикла прироста в этих дубравах оценивали для интервала вероятных значений периода цикла.

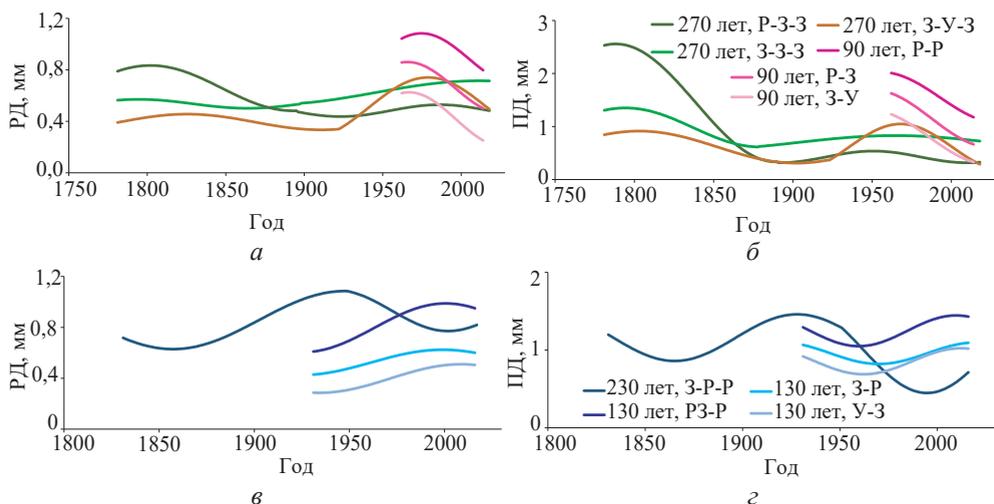


Рис. 2. Вековые циклы радиального прироста РД (а, в) и ПД (б, г) групп деревьев в нагорных (а, б) и пойменных (в, г) дубравах

Fig. 2. The secular cycles of early wood (а, в) and late wood (б, г) radial increment in upland (а, б) and floodplain (в, г) oak groves

Коэффициенты вариации радиального прироста и вековых циклов РД и ПД представлены в табл. 2, параметры ветвей циклов – в табл. 3.

Таблица 2

**Коэффициенты вариации прироста и вековой цикличности РД и ПД**  
**The coefficients of variation of early wood and late wood increment**  
**and secular cyclicality**

Дубравы	Возраст, лет	Ветвь векового цикла, гг.	Группа деревьев	CV, %			
				Прирост		Вековая цикличность	
				РД	ПД	РД	ПД
Нагорные	270	Нисходящая, 1781–1920*	Р–3–3	26	75	21	64
			3–3–3	18	48	5	28
			3–У–3	25	58	11	38
		Восходящая, 1881–2018	Р–3–3	20	50	7	20
			3–3–3	19	45	10	8
			3–У–3	37	64	33	51
	90	Нисходящая, 1962–2014	Р–Р	15	34	7	17
			Р–3	21	43	16	27
			3–У	29	51	25	39
Пойменные	230	Восходящая, 1831–1960	3–Р–Р	27	50	20	17
		Нисходящая, 1891–2017		21	61	12	37
	130	Восходящая, 1931–2016	Р3–Р	22	50	15	20
			3–3	22	48	11	15
			У–3	28	51	19	24

\*Анализируемый отрезок временного ряда.

Первая ветвь векового цикла приходится на возраст дуба до 150–170 лет, на его молодое и средневозрастное генеративное онтогенетическое состояния [4], 2-я – на возраст до 200–250 лет, на средневозрастное и старое генеративное состояния. Первые ветви цикла в нагорных дубравах нисходящие, в пойменных для прироста РД – восходящие, для ПД – в основном восходящие. В пределах экотопа 1-е ветви векового цикла сходны в старовозрастных и более молодых дубравах.

Асинхронность динамики прироста в календарные годы наблюдается как между старовозрастными нагорной и пойменной дубравами, так и в их пределах между старовозрастными и более молодыми дубравами, подтверждая эндогенность вековой цикличности. Это особенно хорошо заметно в пойменных дубравах, где вековые колебания в 2 древостоях находятся практически в противофазе.

В 270-летней дубраве группы деревьев разного роста и развития сходны по фазам максимумов и минимумов векового цикла прироста, отражая историю развития древостоя в целом. Различия этих групп по параметрам векового цикла характеризуют их стратегии роста: деревья быстрого роста (Р–3–3) затем резко снижают прирост и развитие кроны от раскидистого типа к зонтиковидному, среднего роста (3–3–3) наиболее стабильны по приросту и развитию кроны в течение всей жизни, замедленного роста (3–У–3) после 200-летнего возраста обнаруживают способность к увеличению прироста и изменению кроны от узкокронного типа до зонтиковидного. В более молодых дубравах группы деревьев различного развития синхронны в вековой динамике, что может быть следствием их однородности, в частности в нагорной это связано с искусственным происхождением. Как и причины вековых колебаний,

различия вековой динамики изученных дубрав и групп деревьев определяются эндогенными факторами – характером возобновления, начальной густотой насаждения, гетерогенностью по происхождению и возрасту.

Коэффициенты вариации радиального прироста РД и ПД изменяются в широких пределах – соответственно 15–37 и 34–75 %. Примерно в 2 раза меньшая вариативность прироста РД обусловлена его важностью для обеспечения кроны влагой и питательными веществами, т. е. для выживания дерева. CV вековых циклических составляющих прироста РД и ПД также находятся в широких пределах, соответственно 5–33 и 8–64 %, в значительной мере объясняя изменчивость прироста. Коэффициенты корреляции между CV прироста и CV его вековой цикличности – 0,93 для РД и 0,85 для ПД. При CV вековой цикличности равном 0 расчетный CV прироста минимален и составляет 12 % для РД и 30 % для ПД.

Таблица 3

**Параметры ветвей вековых циклов прироста РД и ПД**  
**The parameters of the branches of secular early wood and late wood increment cycles**

Группа деревьев	РД			ПД		
	Период, лет	Средний прирост, мм	Амплитуда, мм	Период, лет	Средний прирост, мм	Амплитуда, мм
<i>Нагорная дубрава, 270 лет (нисходящая ветвь, 1781–1920* гг.)</i>						
Р–3–3	182 <sup>a**</sup>	0,66 <sup>d</sup>	0,18 <sup>e</sup>	202 <sup>a</sup>	1,40 <sup>a</sup>	1,10 <sup>a</sup>
3–3–3	138 <sup>ab</sup>	0,54 <sup>c</sup>	0,04 <sup>g</sup>	170 <sup>a</sup>	0,98 <sup>bc</sup>	0,37 <sup>e</sup>
3–У–3	171 <sup>a</sup>	0,40 <sup>f</sup>	0,06 <sup>g</sup>	199 <sup>a</sup>	0,61 <sup>d</sup>	0,30 <sup>d</sup>
<i>Нагорная дубрава, 270 лет (восходящая ветвь, 1881–2018 гг.)</i>						
Р–3–3	126 <sup>b</sup>	0,48 <sup>e</sup>	0,05 <sup>g</sup>	118 <sup>b</sup>	0,43 <sup>f</sup>	0,11 <sup>f</sup>
3–3–3	266 <sup>a</sup>	0,62 <sup>d</sup>	0,09 <sup>f</sup>	244 <sup>a</sup>	0,70 <sup>d</sup>	0,12 <sup>f</sup>
3–У–3	151 <sup>a</sup>	0,51 <sup>e</sup>	0,24 <sup>d</sup>	130 <sup>b</sup>	0,61 <sup>d</sup>	0,43 <sup>e</sup>
<i>Нагорная дубрава, 90 лет (нисходящая ветвь, 1962–2014 гг.)</i>						
Р–Р	120±20 <sup>***</sup>	0,89 <sup>e</sup> ±0,05	0,20 <sup>e</sup> ±0,05	150±20	1,50 <sup>a</sup> ±0,20	0,48 <sup>bc</sup> ±0,20
Р–3		0,66 <sup>d</sup> ±0,03	0,20 <sup>e</sup> ±0,03		1,20 <sup>a</sup> ±0,10	0,54 <sup>b</sup> ±0,02
3–У		0,42 <sup>f</sup> ±0,04	0,21 <sup>e</sup> ±0,04		0,80 <sup>b</sup> ±0,10	0,51 <sup>b</sup> ±0,02
<i>Пойменная дубрава, 230 лет (восходящая ветвь, 1831–1960 гг.)</i>						
3–Р–Р	181 <sup>a</sup>	0,86 <sup>c</sup>	0,23 <sup>de</sup>	126 <sup>b</sup>	1,20 <sup>ab</sup>	0,30 <sup>d</sup>
<i>Пойменная дубрава, 230 лет (нисходящая ветвь, 1891–2017 гг.)</i>						
3–Р–Р	120 <sup>b</sup>	0,93 <sup>bc</sup>	0,16 <sup>e</sup>	131 <sup>b</sup>	1,00 <sup>b</sup>	0,56 <sup>b</sup>
<i>Пойменная дубрава, 130 лет (восходящая ветвь, 1931–2016 гг.)</i>						
Р3–Р	150±20	0,80 <sup>cd</sup> ±0,30 <sup>e</sup>	0,19 <sup>e</sup> ±0,02	100±20	1,20 <sup>ab</sup> ±0,10	0,20 <sup>e</sup> ±0,05
3–3		0,52 <sup>e</sup> ±0,02	0,10 <sup>f</sup> ±0,02		0,96 <sup>bc</sup> ±0,04	0,14 <sup>f</sup> ±0,03
У–3		0,40 <sup>f</sup> ±0,01	0,11 <sup>f</sup> ±0,01		0,86 <sup>c</sup> ±0,03 <sup>e</sup>	0,17 <sup>e</sup> ±0,03

\*Анализируемый отрезок временного ряда. \*\*Если в обозначении величин нет одинаковых букв, различие между ними значимо на уровне 0,05. Сравнение проведено по каждому параметру цикла, совместно для всех объектов исследования и совместно для РД и ПД. \*\*\*Фиксированные средние и граничные значения.

Период 1-й ветви векового цикла прироста РД и ПД (табл. 3) в старовозрастной нагорной дубраве находится в диапазоне 138–202 года, значимых различий не обнаружено. При этом максимум и снижение прироста

ПД начинаются в среднем на 12 лет раньше, чем для РД. В группе среднего роста уменьшение прироста РД прекратилось прежде, чем в других, примерно на 20 лет. У старовозрастных пойменных дубрав  $T$  прироста РД находится в том же диапазоне, что и у нагорных, а для ПД показатель значимо меньше, поскольку на восходящей ветви прирост ПД достиг минимума немного позже, а максимума на 16 лет раньше по сравнению с РД. Не исключено, что в более молодых нагорной и пойменной дубравах  $T$  1-й ветви меньше, чем в старовозрастных, учитывая, что развитие старовозрастных дубрав проходило в климатических условиях малого ледникового периода.

Вторые ветви вековых циклов представлены только в старовозрастных дубравах. В нагорной дубраве период 2-й ветви РД и ПД в группах быстрого и замедленного роста меньше, чем 1-й (значимо для прироста ПД 2 групп и прироста РД группы быстрого роста). В группе среднего роста, напротив, период 2-й ветви цикла РД и ПД значимо больше, чем 1-й. Во всех группах нагорной дубравы максимум и снижение прироста ПД наступает значимо раньше, чем РД, в среднем примерно на 30 лет. В пойменной дубраве период 2-й ветви векового цикла прироста РД и ПД сходен с периодом в нагорной. Более ранние максимум и уменьшение прироста ПД по сравнению с РД в обоих старовозрастных дубравах отражают поддержание стабильности развития кроны за счет роста ствола.

На 1-й ветви векового цикла  $y_0$  РД и ПД значимо различается в группах от быстрого до замедленного роста, как в нагорных, так и в пойменных дубравах. Во всех изученных группах деревьев  $y_0$  прироста ПД значимо выше, чем РД. Соотношение  $y_0$  прироста ПД и РД, отражающее характер распределения ресурсов между ростом ствола и развитием кроны, у всех групп деревьев лежит в пределах 1,4–2,2 и в среднем сходно в изученных дубравах.

На 2-й ветви векового цикла в старовозрастной нагорной дубраве группы деревьев сблизилась по параметру  $y_0$ , значимо увеличившись по РД в группах среднего и замедленного роста и по ПД в группе среднего роста и значимо снизившись по РД и ПД в группе быстрого роста. В результате на 2-й ветви векового цикла  $y_0$  ПД и РД во всех группах деревьев соответствует среднему в древостое, развитие их крон можно отнести к зонтиковидному типу. Соотношение  $y_0$  прироста ПД и РД по сравнению с 1-й ветвью цикла снизилось – до 0,9–1,2. В старовозрастной пойменной дубраве  $y_0$  прироста ПД и РД не изменилось значимо, но их соотношение также уменьшилось – до 1,1. Можно полагать, что это следствие возрастной закономерности деревьев и древостоев: замедления роста ствола и перераспределения ресурсов на развитие кроны с усилением данных процессов в условиях снижения сомкнутости полога. На рис. 3 приведены изображения кернов ствола деревьев разного возраста в период 1981–2000 гг.: при сходном приросте РД прирост ПД старовозрастных деревьев значительно ниже, чем более молодых, как в нагорной, так и в пойменной дубравах.



а



б

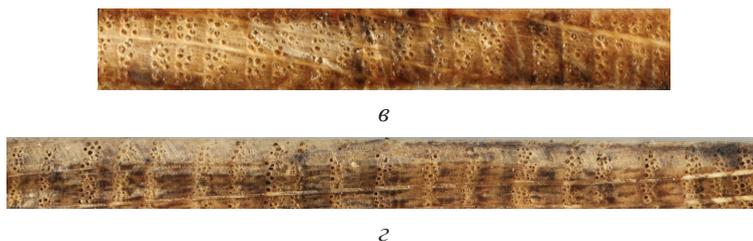


Рис. 3. Отсканированные изображения кернов стволов старовозрастных (*а, в*) и более молодых деревьев (*б, з*) в нагорных (*а, б*) и пойменных (*в, з*) дубравах в 1981–2000 гг.

Fig. 3. The scanned images of stem core samples of old-growth (*a, в*) and younger (*б, з*) trees in upland (*а, б*) and floodplain (*в, з*) oak groves in 1981–2000

Максимальные амплитуды прироста РД во всех дубравах сходны, составив на 1-й ветви векового цикла 0,18–0,23 мм, на 2-й – 0,16–0,24. Эти величины близки к ширине 1 ряда сосудов РД, они свидетельствуют о смене типа развития кроны при изменении прироста РД: от максимума до минимума цикла – об ухудшении, от минимума до максимума – об улучшении, что отражено в обозначении групп деревьев. Изменение прироста РД на нисходящих и восходящих ветвях цикла ограничивается шириной 1 ряда сосудов РД. Амплитуды прироста ПД в большинстве случаев значимо больше на нисходящих ветвях циклов.

Относительное изменение прироста в вековой динамике, характеризующее соотношением  $A/y_0$ , варьирует в широком диапазоне. При этом  $A/y_0$  прироста ПД всех изученных групп деревьев и ветвей векового цикла равно или больше, чем РД. На 1-й ветви векового цикла в 270- и 90-летних нагорных дубравах оно больше соответственно в среднем в 3,8 и 1,2 раза, в 230- и 130-летних пойменных оно соответственно равно и больше в 1,3 раза. На 2-й ветви цикла  $A/y_0$  прироста ПД превосходит показатель для РД в старовозрастной нагорной дубраве в 1,7 раза, в пойменной – в 3,5 раза. То есть на нисходящих ветвях вековых циклов относительное снижение прироста ПД значительно больше по сравнению с РД – в 1,2–3,8 раза, а на восходящих ветвях увеличение ПД превышает показатель для РД только в 1,0–1,7 раза. Очевидно, таким образом поддерживается стабильность развития кроны за счет роста ствола.

В группах наименее развитых деревьев на 1-й ветви векового цикла для 270-летней нагорной дубравы отмечена существенно меньшая амплитуда прироста РД, чем в 90-летней – примерно в 4 раза и чем в 130-летней пойменной – в 2 раза. Также у угнетенных деревьев в 270-летней дубраве зафиксировано меньшее соотношение  $y_0$  ПД и РД – 1,5, тогда как в 90-летней – 2,7, 130-летней – 2,2. Вероятно, эти различия объясняются стратегией выживания угнетенных деревьев в период быстрого роста древостоя. В старовозрастной нагорной дубраве их сохранение обеспечивалось стабильностью развития кроны при ограниченном росте ствола, что характерно для нижней части полога при достаточном освещении. В 90-летних культурах в условиях высокой густоты угнетенные деревья развивались преимущественно в высоту, за счет развития кроны. В 130-летней пойменной дубраве густота первоначально была велика, а затем существенно снизилась после усыхания дуба в 40–60-х гг.

В исследовании нисходящего возрастного тренда радиального прироста в нагорных дубравах [11] соотношение приростов ПД и РД равное 0,4 принято за контрольное, ниже которого повышается вероятность отмирания дуба. Наименьшее значение этого показателя в вековой динамике (около 0,6) наблюдается

в минимумах циклов в старовозрастных дубравах. Как показано в данной статье, в ряде случаев соотношение приростов ПД и РД не может использоваться как индикатор жизненного состояния, поскольку зависит от других факторов. Так, в области максимумов вековых циклов прирост ПД начинает снижаться раньше, чем РД, в результате уменьшается соотношение ПД и РД, что объясняется стабилизацией развития кроны за счет роста ствола. В группах от быстрого до замедленного роста это соотношение падает в 270-летней нагорной дубраве, но увеличивается в 90-летней нагорной и 130-летней пойменной дубравах, в зависимости от стратегии роста деревьев. При переходе от 1-й ко 2-й ветви векового цикла зафиксировано значимое повышение  $y_0$  РД при снижении соотношения  $y_0$  ПД и РД в связи с возрастными закономерностями.

Прирост РД является наиболее надежным индикатором долговременного жизненного состояния дуба, характеризуя состояние скелетных ветвей и его изменения, особенно при смене типов развития кроны (пересечении приростом РД значений 0,4 и 0,8 мм). Прирост ПД отражает потенциал жизненного состояния как возможность стабилизации развития кроны благодаря снижению роста ствола. Те же выводы сделаны при анализе внутривековой цикличности в 90-летней нагорной и 130-летней пойменной дубравах [7]. В этих дубравах риск усыхания дуба повышается при многолетнем уменьшении прироста поздней древесины до 0,5 мм, что наблюдалось в минимумах внутривековых циклов у дуба со средним и ниже среднего развитием. У изученных старовозрастных групп деревьев прирост ПД в вековой динамике снижался в минимумах цикла до <0,5 мм. Последние вековые минимумы или близкие к ним приросты ПД достигнуты примерно с 1980 г. в 230-летней пойменной дубраве, с 1990 г. – в 270-летней нагорной и с 2000 г. – в 90-летней нагорной.

Предельный возраст дуба семенного происхождения в насаждениях Центральной лесостепи в благоприятных лесорастительных условиях оценивается в 250–300 лет, а отдельно стоящих деревьев – 350–400 лет; в конце жизни для дуба характерны болезни ствола или отмирание значительной части кроны [12]. В старовозрастных естественных сообществах большая часть деревьев погибает в старом генеративном состоянии, не доживая до синильного, их отпад ускоряется болезнями и ветровалами [4]. Деревья погибают не из-за генетически запрограммированного старения их меристем, а, вероятнее, по причине внешнего воздействия [20].

В нагорных дубравах 120–140- и 220–240-летнего возраста, расположенных вблизи объектов нашего исследования, доля гнилей в объеме ствола составила соответственно 3 и 40 %, что ослабило прочность стволов в старовозрастном древостое и вызвало буреломы и ветровалы [13]. В старовозрастных нагорных дубравах наблюдалось снижение числа стволов дуба: за 1-ю половину XX в. примерно в 2 раза – с 100–170 до 45–60 га<sup>-1</sup>, за 2-ю в 3 раза – до 15–20 га<sup>-1</sup> [14]. Изученное 270-летнее насаждение по учетам 1983–2009 гг. было в наиболее хорошем состоянии среди старовозрастных нагорных дубрав. Около 80 % живых деревьев дуба относились к 1-й и 2-й категориям состояния, с 1993 по 2008–2011 гг. усохло около 10 %, число дубов снизилось с 11,6 до 10,5 га<sup>-1</sup> [9]. Вероятно, до 350–400-летнего возраста здесь доживут лишь единичные деревья дуба.

Вместе с тем, как показано в нашем исследовании, жизненное состояние обследованных старовозрастных дубов можно оценить по параметрам радиального прироста как вполне удовлетворительное. В 1-й половине XX в. прирост РД в нагорных и пойменных дубравах повысился, т. е. развитие крон и жиз-

ненное состояние дуба улучшились. Ко 2-й половине XX – началу XXI в. эти показатели находились в области векового максимума либо снижались без изменения типа развития кроны. 230-летние дубы способны давать семенное потомство такого же качества, что и в возрасте спелости [9]. Зависимости между поражением гнилями ствола и состоянием кроны не обнаружено [13]. Очевидно, до 100–150-летнего возраста дубрав жизненное состояние и выживаемость деревьев лимитируются развитием кроны, затем, после разреживания полога, – в большей степени болезнями ствола и кроны. В условиях меньшего поражения гнилями долговечность дуба могла бы быть значительно выше.

### Выводы

1. Выделенные вековые колебания вызваны ростом и развитием дуба в условиях конкуренции и самоизреживания. Различия параметров вековой динамики изученных дубрав и групп деревьев также определяются эндогенными факторами – характером возобновления и начальной густотой насаждения, гетерогенностью по происхождению и возрасту.

2. В нагорных дубравах, возобновившихся на вырубках, 1-я ветвь цикла – нисходящая, в пойменных дубравах, начавших рост под пологом, – восходящая. В старовозрастных и более молодых дубравах 1-е ветви цикла сходны, отражая возрастную тренд. Первая ветвь векового цикла прироста приходится на возраст дуба до 150–170 лет, 2-я – до 200–250 лет.

3. CV радиального прироста РД и ПД варьирует в широких пределах – соответственно 15–37 и 34–75 %, вековых циклов – соответственно 5–33 и 8–64 %, в значительной мере объясняя изменчивость прироста.

4. На нисходящих ветвях вековых циклов относительное снижение прироста ПД значительно больше, чем РД – в 2–4 раза, а на восходящих ветвях его относительное увеличение превышает показатели для РД только в 1,0–1,7 раза. Очевидно, таким образом поддерживается стабильность развития кроны за счет роста ствола. В вековом цикле прирост РД изменялся максимум на ширину 1 ряда сосудов, а тип развития кроны – на смежный тип.

5. Прирост РД является надежным индикатором долговременного жизненного состояния дуба, в то время как прирост ПД характеризует потенциал его стабильности.

6. При переходе от 1-й ко 2-й ветви векового цикла средний прирост РД в большинстве случаев увеличивается, а соотношение средних приростов ПД и РД снижается, что можно рассматривать как возрастную закономерность – перераспределение ресурсов с роста ствола на развитие кроны.

7. Жизненное состояние изученных старовозрастных деревьев дуба по параметрам радиального прироста можно оценить как удовлетворительное. При меньшем поражении гнилями долговечность дуба черешчатого могла бы быть ощутимо больше.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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

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

2. Бугаев В.А., Мусиевский А.Л., Царалунга В.В. Дубравы лесостепи. Воронеж: ВГЛА, 2013. 247 с.

Bugaev V.A., Musievskij A.L., Tsaralunga V.V. *Oak Groves of Forest-Steppe*. Voronezh, Voronezh State Academy of Forestry Publ., 2013. 247 p. (In Russ.).

3. Демаков Ю.П., Исаев А.В. Закономерности динамики радиального прироста деревьев дуба в пойменных лесах заповедника // Науч. тр. гос. природ. заповедника «Большая Кокшага». 2015. Вып. 7. С. 139–156.

Demakov Yu.P., Isaev A.V. Regularities of Dynamics of English Oak Increment in Floodplain Forests of the “Bolshaya Kokshaga” Nature Reserve. *Nauchnye trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika “Bolshaya Kokshaga”* = Scientific Papers of the State Nature Reserve “Bolshaya Kokshaga”, 2015, iss. 7, pp. 139–156. (In Russ.).

4. Диагнозы и ключи возрастных состояний лесных растений. Деревья и кустарники: метод. разработки для студентов биол. специальностей / под ред. О.В. Смирновой. М.: Прометей, 1989. 105 с.

*Diagnoses and Keys of Age Conditions of Forest Plants. Trees and Shrubs: Methodical Guidelines for Biology Students*. Ed. by O.V. Smirnova. Moscow, Prometej Publ., 1989. 105 p. (In Russ.).

5. Каплина Н.Ф. Влияние развития кроны на радиальный прирост ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 2(42). С. 17–25.

Kaplina N.F. Influence of Crown Development on Radial Increment of Early and Late Stem Wood of *Quercus robur*. *Vestnik Povolzhskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2019, no. 2(42), pp. 17–25. (In Russ.).

6. Каплина Н.Ф. Составляющие динамики прироста ранней и поздней древесины ствола дуба черешчатого в нагорной дубраве южной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 51–63.

Kaplina N.F. Components of the Increment Dynamics of Early and Late Wood of *Quercus robur* Stem in the Upland Oak Forest of the Southern Forest-Steppe. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 5, pp. 51–63. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-51-63>

7. Каплина Н.Ф. Цикличность радиального прироста ствола и жизненное состояние дуба черешчатого в нагорной и пойменной дубравах южной лесостепи // Лесоведение. 2022. № 1. С. 21–33.

Kaplina N.F. Cyclicity of Radial Increment of Trunk and Vitality of the *Quercus Robur* in Upland and Floodplain Oak Forests of Southern Forest Steppe. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2022, no. 1, pp. 21–33. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31857/S0024114821060061>

8. Каплина Н.Ф., Селочник Н.Н. Текущее и долговременное состояние дуба черешчатого в трех контрастных типах леса южной лесостепи // Лесоведение. 2015. № 3. С. 191–201.

Kaplina N.F., Selochnik N.N. Current and Long-Term State of the English Oak in Three Contrasting Forest Types in Southern Forest-Steppe. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 3, pp. 191–201. (In Russ.).

9. Селочник Н.Н. Многолетняя динамика старовозрастных насаждений Теллермановских дубрав // Лесоведение. 2014. № 2. С. 59–68.

Selochnik N.N. Long-Term Dynamics of Old-Grown Stands of Tellerman Oak Forests. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2014, no. 2, pp. 59–68. (In Russ.).

10. Скрябин М.П. Дубовые леса и вековые циклы в природных условиях // Науч. зап. Воронеж. лесотехн. ин-та. 1960. Т. XX. Восстановление и повышение производительности дубрав лесостепи. С. 211–217.

Scriabin M.P. Oak Forests and Secular Cycles in Natural Conditions. *Nauchnye zapiski Voronezhskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 190, vol. 20, *Vosstanovlenie i povyshenie proizvoditel'nosti dubrav lesostepi*, pp. 211–217. (In Russ.).

11. Тихомиров А.В. Годичный прирост ранней и поздней древесины в локальных участках камбиальной зоны ствола как показатель этапов роста и развития дерева *Quercus robur* (Fagaceae) // Ботан. журн. 2022. № 4. С. 360–384.

Tikhomirov A.V. Annual Increment of Earlywood and Latewood in Local Portions of Cambial Zone as Indicator of the Stages of Tree Growth and Development of *Quercus robur* (Fagaceae) Trunk. *Botanicheskij zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 360–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S000681362204007X>

12. Царалунга В.В., Царалунга А.В. Долголетие деревьев дуба и дубовых древостоев // Лесотехн. журн. 2017. № 4. С. 25–32.

Tsaralunga V.V., Tsaralunga A.V. The Longevity of Oak Trees and Oak Forest. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, no. 4, pp. 25–32. (In Russ.) <https://dx.doi.org/10.12737/25189>

13. Чеботарев П.А., Чеботарева В.В., Стороженко В.Г. Гнилевые фауны спелых и перестойных дубовых древостоев Теллермановского опытного лесничества // Лесоведение. 2019. № 1. С. 49–56.

Chebotaev P.A., Chebotareva V.V., Storozhenko V.G. Decay Defects of Mature and Old-Growth Oak Stands Tellerman Experimental Forestry. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 1, pp. 49–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010054>

14. Экосистемы Теллермановского леса / под ред. В.В. Осипова. М.: Наука, 2004. 340 с.

*Tellerman Forest Ecosystems*. Ed. by V.V. Osipov. Moscow, Nauka Publ., 2004. 340 p. (In Russ.).

15. Cho D.S., Boerner R.E.J. Dendrochronological Analysis of the Canopy History of Two Ohio Old-Growth Forests. *Plant Ecology*, 1995, vol. 120, pp. 173–183. <https://doi.org/10.1007/BF00034346>

16. Dobbertin M. Tree Growth as Indicator of Tree Vitality and of Tree Reaction to Environmental Stress: a Review. *European Journal of Forest Research*, 2005, vol. 124, pp. 319–333. <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0085-3>

17. Helińska-Raczkowska L. Variation of Vessel Lumen Diameter in Radial Direction as an Indication of the Juvenile Wood Growth in Oak (*Quercus petraea* Liebl). *Annals of Forest Science*, 1994, vol. 51, no. 3, pp. 283–290. <https://doi.org/10.1051/forest:19940307>

18. McEwan R.W., McCarthy B.C. Anthropogenic Disturbance and the Formation of Oak Savanna in Central Kentucky, USA. *Journal of Biogeography*, 2008, vol. 35, iss. 5, pp. 965–975. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01857.x>

19. Nowacki G.J., Abrams M.D. Radial-Growth Averaging Criteria for Reconstructing Disturbance Histories from Presettlement-Origin Oaks. *Ecological Monographs*, 1997, vol. 67, iss. 2, pp. 225–249. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0225:RGACFR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0225:RGACFR]2.0.CO;2)

20. Piovesan G., Biondi F. On Tree Longevity. *New Phytologist*, 2021, vol. 231, iss. 4, pp. 1318–1337. <https://doi.org/10.1111/nph.17148>

21. Rubio-Cuadrado Á., Camarero J.J., del Río M., Sánchez-González M., Ruiz-Peinado R., Bravo-Oviedo A., Gil L., Montes F. Long-Term Impacts of Drought on Growth and Forest Dynamics in a Temperate Beech-Oak-Birch Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, vol. 259, pp. 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.015>

22. Scharnweber T., Heinze L., Cruz-García R., van der Maaten-Theunissen M., Wilming M. Confessions of Solitary Oaks: We Grow Fast but We Fear the Drought. *Dendrochronologia*, 2019, vol. 55, pp. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.001>

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

Научная статья

УДК 630\*165.51

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-24-37

## Жизнеспособность пыльцы природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма

**В.П. Коба<sup>1</sup>**, д-р биол. наук, проф., зав. лаб.; *ResearcherID*: [АНН-4819-2022](https://orcid.org/0000-0002-2144-0836),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0836>

**О.О. Коренькова<sup>2</sup>**, канд. биол. наук, доц.; *ResearcherID*: [АНН-3052-2022](https://orcid.org/0000-0001-6482-7312),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6482-7312>

**Н.А. Макаров<sup>1</sup>**, аспирант; *ResearcherID*: [HZH-5696-2023](https://orcid.org/0009-0009-0536-4747),

*ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-0536-4747>

<sup>1</sup>Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, спуск Никитский, д. 52, г. Ялта, Республика Крым, Россия, 298648; kobavp@mail.ru, makarov.crimea@yandex.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337; o.o.korenkova@mail.ru<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 21.04.23 / Одобрена после рецензирования 27.07.23 / Принята к печати 29.07.23

**Аннотация.** Показатели качества пыльцы являются важнейшими характеристиками развития мужских генеративных структур. Для видов рода *Pinus* L. большое значение имеет количественная оценка результативности развития мужской генеративной сферы, т. к. первые, наиболее важные, этапы формирования семян имеют прямую связь с объемом продуцируемой насаждениями пыльцы и уровнем ее жизнеспособности. Исследование проводили в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма. Для сбора образцов пыльцы и изучения ее качества были заложены пробные площади по 4 гипсометрическим профилям в западной части южного макросклона главной гряды Крымских гор на мысе Айя, в урочищах Аязьма, Батилиман и в восточной – на г. Караул-Оба и в урочище Новый Свет. На пробных площадях с 10 модельных деревьев собирали пыльцу в период ее свободного вылета. Установлено, что пыльца *P. brutia* var. *pityusa*, произрастающей в западной части горного Крыма, имеет более высокое качество в сравнении с пыльцой деревьев восточных территорий. В восточной части также наблюдается увеличение количества аномалий размера и формы пыльцевого зерна, что связано с ухудшением температурного режима в период микроспорогенеза. Изучение свойств пыльцы с использованием метода проращивания на искусственной питательной среде выявило снижение уровня жизнеспособности пыльцы по сравнению с результатами ацетокарминового тестирования, различия составили 4–9 %. При этом наиболее высокий уровень прорастания пыльцы отмечен для насаждений верхней части массива – среднее значение составило 89,9±2,5 %, для центральной и нижней частей оно равнялось 88,1±2,7 и 87,9±3,5 % соответственно. Совместное применение 2 способов оценки жизнеспособности пыльцы позволило предложить новый показатель ее качества – индекс реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы. При помощи данного подхода установлено, что наиболее низкий индекс свойствен насаждениям центральной части лесного массива урочища Аязьма – 0,911.

**Ключевые слова:** *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba, природные популяции, пыльца, жизнеспособность, пыльцевые трубки, аномалии формы, аномалии размера

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-24-20128 «Научные основы формирования системы охраны и мониторинга природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма».

**Для цитирования:** Коба В.П., Коренькова О.О., Макаров Н.А. Жизнеспособность пыльцы природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 24–37. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-24-37>

Original article

## The Viability of Pollen from Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in the Mountainous Crimea

**Vladimir P. Koba**<sup>1</sup>, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AHH-4819-2022](https://orcid.org/0000-0002-2144-0836),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0836>

**Olesya O. Korenkova**<sup>2</sup>, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AHH-3052-2022](https://orcid.org/0000-0001-6482-7312),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-7312>

**Nikitia A. Makarov**<sup>1</sup>, Postgraduate Student, ResearcherID: [HZH-5696-2022](https://orcid.org/0009-0009-0536-4747),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0536-4747>

<sup>1</sup>Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Centre of RAS, Nikitsky Spusk, 52, Yalta, Republic of Crimea, 298648, Russian Federation; kobavp@mail.ru, makarov.crimea@yandex.ru

<sup>2</sup>National Research University Moscow State University of Civil Engineering, sh. Yaroslavlskoye, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; o.o.korenkova@mail.ru

Received on April 21, 2023 / Approved after reviewing on July 27, 2023 / Accepted on July 29, 2023

**Abstract.** Pollen quality indicators are the most important characteristics of the development of male generative structures. For species of the genus *Pinus* L., a quantitative assessment of the effectiveness of the development of the male generative sphere is of great importance, since the first, most important stages of seed formation are directly related to the volume of pollen produced by plantings and the level of its viability. The research has been carried out in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* of the Mountainous Crimea. To collect pollen samples and study its quality, test plots have been laid for 4 hypsometric profiles in the western part of the southern macroslope of the main ridge of the Crimean Mountains on Cape Aya, in the Ayazma and Batiliman Mountain Areas and in the eastern part – on Karaul-Oba Mount and in the Novyj Svet Mountain Area. Pollen has been collected from 10 model trees in the test plots during its free flight period. It has been established that the pollen of *P. brutia* var. *pityusa*, which grows in the western part of the mountainous Crimea, has a higher quality compared to the pollen of trees in the eastern territories. In the eastern part, there is also an increase in the number of anomalies in the size and shape of pollen grains, which is associated with deterioration in the temperature regime during the period of microsporogenesis. The study of pollen properties using the germination method on an artificial nutrient medium has revealed a decrease in the level of viability of pollen compared to the results of acetocarmine testing; the differences have been 4–9 %. Meanwhile, the highest level of pollen germination has been observed in the plantations of the upper part of the tract – the average value has been  $89.9 \pm 2.5$  %, for the central and lower parts it has been  $88.1 \pm 2.7$  and  $87.9 \pm 3.5$  %, respectively. The combined use of 2 methods to assess the viability of pollen made it possible to propose a new indicator of its quality – the index of realization of the male gametophyte at the stage of pollen germination. This approach has allowed us to establish that the lowest index is characteristic of the plantations of the central part of the forest tract of the Ayazma Mountain Area – 0.911.



**Keywords:** *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba, natural populations, pollen, viability, pollen tubes, shape anomalies, size anomalies

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant no. 22-24-20128 “Scientific Foundations of the Formation of a System for the Protection and Monitoring of Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba of the Mountainous Crimea”.

**For citation:** Koba V.P., Korenkova O.O., Makarov N.A. The Viability of Pollen from Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in the Mountainous Crimea. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 24–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-24-37>

### Введение

В число важных задач охраны и воспроизводства редких и исчезающих видов растений входят изучение процессов их репродукции, оценка влияния факторов внешней среды на состояние и уровень развития генеративной сферы [26, 28]. Решение данных вопросов обеспечит возможность формирования методологических подходов и практических рекомендаций в области совершенствования системы поддержания биоэкологического потенциала и сохранения численности видов растений, которые в настоящее время характеризуются критическим снижением семенного возобновления, сокращением территории естественного произрастания.

Природные насаждения *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) распространены в восточной и западной частях Горного Крыма. *P. brutia* var. *pityusa* занесена в Красную книгу Российской Федерации и Республики Крым как реликтовый вид, крымско-новороссийский эндемик, находящийся под угрозой исчезновения [5]. В настоящее время проблемы охраны *P. brutia* var. *pityusa* в значительной степени усугубляются глубокой трансформацией условий произрастания в местах ее естественного распространения в связи с постоянно возрастающим уровнем неорганизованной рекреации.

Показатели качества пыльцы являются важнейшими характеристиками развития мужских генеративных структур. Для видов рода *Pinus* L. большое значение имеет количественная оценка результативности развития мужской генеративной сферы, т. к. первые, наиболее важные, этапы формирования семян напрямую связаны с объемом продуцируемой насаждениями пыльцы и уровнем ее жизнеспособности [3, 7, 19, 25]. Успешность формирования и развитие пыльцы обуславливают уровень ее жизнеспособности и динамику роста пыльцевых трубок, что, в свою очередь, позволяет анализировать результативность развития мужских репродуктивных структур в связи с видовыми отличиями и спецификой условий произрастания [21, 29]. Большинство исследований, посвященных изучению жизнеспособности пыльцы хвойных растений *in vitro*, проведено по *Pinus sylvestris* L. *P. brutia* var. *pityusa* изучена в меньшей степени, немногочисленны работы по оценке изменчивости жизнеспособности ее пыльцы в зависимости от динамики условий произрастания [2, 11, 23, 24].

Целью исследования стали характеристика качества пыльцы природных популяций *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма, анализ влияния условий произрастания на уровень жизнеспособности, длину пыльцевых трубок и количество нарушений морфогенеза пыльцевого зерна.

## Объекты и методы исследования

Исследование проводили в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма. Для сбора образцов пыльцы и изучения ее качества с использованием методов лесной таксации [1] по 4 гипсометрическим профилям были заложены пробные площади. Объекты располагались в западной части южного макросклона главной гряды Крымских гор: на мысе Айя, в урочищах Аязьма и Батилиман; в восточной: на г. Караул-Оба и в урочище Новый Свет (рис. 1). В урочище Аязьма высота пробных площадей над уровнем моря составляет 50, 180, и 290 м, в Батилимане – 50 и 120 м, на г. Караул-Оба – 40, 70 и 120 м, в урочище Новый Свет – 50 и 100 м. Все пробные площади имели юго-восточную экспозицию с крутизной склонов  $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ .



Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма

Fig. 1. The schematic map of the location of test plots in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

На каждой пробной площади выбрано 10 модельных деревьев. В конце апреля 2022 г. в период вылета пыльцы ее собирали с модельных деревьев посредством стряхивания микростробиллов в простерилизованные бюксы. Во время проведения лабораторных исследований пыльцу хранили в эксикаторе над хлористым кальцием при температуре  $5^{\circ}\text{C}$  [14]. Жизнеспособность пыльцы определяли по З.П. Паушевой путем окрашивания образцов ацетокармином. Окрашенные пыльцевые зерна подсчитывали в 10 полях зрения при помощи цифрового микроскопа Bresser LCD Micro 5mp. Потенциально жизнеспособные пыльцевые зерна интенсивно окрашиваются ацетокармином. Стерильная пыльца не окрашивается. На проращивание пыльцу ставили через 5–6 дней после сбора в висячей капле питательной среды – 5%-й раствор сахарозы [14]. Для каждого образца на 6-й день проращивания определяли качество пыльцы [4, 14]. Жизнеспособными считали пыльцевые зерна, образующие трубки, длина которых превышала высоту тела пыльцевого зерна. С каждого модельного дерева у 30 пыльцевых зерен измеряли длину пыльцевых трубок с точностью до 1 мкм. Микроизмерения проводили с использованием компьютерной программы AmScor, которая позволяет масштабировать изучаемые объекты с высоким разрешением и фиксировать цифровые снимки в отдельных файлах. При

оценке влияния климатических факторов на развитие мужских репродуктивных структур *P. brutia* var. *pityusa* применяли данные метеостанций г. Севастополь и г. Судак. Количественные результаты наблюдений обрабатывали методами вариационной статистики [9].

### Результаты исследования и их обсуждение

Для определения жизнеспособности пыльцы чаще всего используют окрашивание ацетокармином и ее прорастивание в лабораторных условиях на искусственной питательной среде. Считается, что точнее второй способ, который дает возможность анализировать рост пыльцевых трубок и последующие этапы развития мужского гаметофита [6, 17, 20]. Однако метод окрашивания позволяет с меньшими затратами времени и труда оценивать качество пыльцы. Окрашивание ацетокармином пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* насаждений урочища Аязьма показало наибольшую для центральной части массива лесов на высоте 180 м над ур. м. жизнеспособность – среднее количество прокрашенных пыльцевых зерен составило  $96,7 \pm 1,5$  %. В нижнем и среднем поясе она была примерно одинакова. Прорастивание на искусственной питательной среде выявило некоторое снижение жизнеспособности пыльцы по сравнению с результатами ацетокарминового тестирования, различия составили 4–9 %. При этом лучшее прорастание пыльцы наблюдалось у насаждений верхней части массива лесов *P. brutia* var. *pityusa*, среднее значение для них составило  $89,9 \pm 2,5$  %, для центральной и нижней частей показатель был  $88,1 \pm 2,7$  и  $87,9 \pm 3,5$  % соответственно (см. таблицу).

### Показатели качества пыльцы природных популяций *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма The pollen quality indicators of natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

Высота над уровнем моря, м	Окрашенная пыльца, %		Проросшая пыльца, %		Длина пыльцевой трубки, мкм	
	M±m	CV	M±m	CV	M±m	CV
<i>Аязьма</i>						
50	94,0±2,2	6,8	87,9±3,5	10,7	148,0±13,9	19,2
180	96,7±1,5	4,7	88,1±2,7	10,6	143,1±8,2	13,4
290	94,1±2,2	7,2	89,9±2,5	7,8	129,2±7,8	15,0
<i>Батилиман</i>						
50	96,2±1,6	5,3	92,2±1,9	5,6	160,3±13,2	21,3
120	97,9±1,1	3,4	93,3±2,1	5,8	139,5±13,9	22,7
<i>Караул-Оба</i>						
40	81,2±5,9	15,5	70,4±4,2	13,1	118,4±11,8	23,1
70	80,1±3,2	12,8	73,9±3,9	12,4	89,3±9,8	25,2
120	81,3±5,9	22,9	69,9±4,7	14,9	124,2±12,1	26,8
<i>Новый Свет</i>						
50	87,5±2,6	8,8	65,8±4,8	14,5	84,3±5,6	24,0
100	86,7±4,1	14,8	73,6±4,3	13,8	96,5±6,4	26,7

Окрашивание ацетокармином позволяет оценить пыльцевые зерна по текущему состоянию развития мужского гаметофита. При прорастивании

не все из них реализуют свой жизненный потенциал. Результаты характеристики пыльцы рассматриваемыми способами дают возможность установить уровень реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцевого зерна. В данном случае жизнеспособность пыльцы, определенная окрашиванием, является показателем количества пыльцевых зерен, проявляющих функциональность на уровне биохимических процессов жизнедеятельности. Доля проросшей пыльцы отражает эффективность последующего этапа репродуктивного цикла, когда в процессе прорастания реализуется лишь часть потенциально жизнеспособной пыльцы. Степень реализации мужского гаметофита на данной стадии можно определить, используя следующую формулу:

$$I_r = W/V,$$

где  $I_r$  – индекс реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы;  $W$ ,  $V$  – жизнеспособность пыльцы по данным проращивания и окрашивания соответственно.

Если все прокрашенные пыльцевые зерна проявляют жизнеспособность при проращивании на питательной среде, индекс равен 1, т. е. наблюдается максимальное прорастание потенциально жизнеспособной пыльцы. В случае снижения числа проросших зерен в сравнении с прокрашенными пыльцевыми зернами индекс уменьшается, характеризуя уровень реализации мужских гаметофитов на этапе начала формирования пыльцевых трубок.

С использованием данного подхода выявлено, что наиболее низкий уровень реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы свойствен насаждениям *P. brutia* var. *pityusa* центральной части лесного массива урочища Аязьма, для которых индекс составил 0,911 (рис. 2).

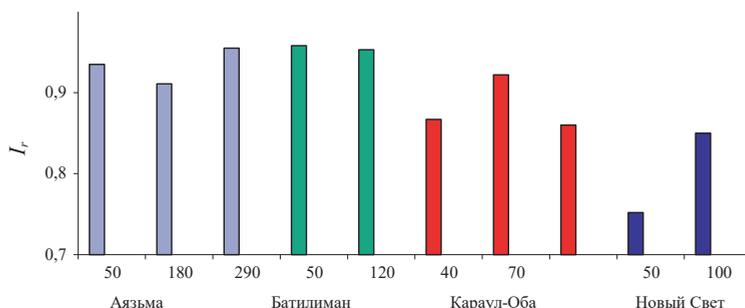


Рис. 2. Уровень реализации мужского гаметофита в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* на стадии прорастания пыльцы для территории Горного Крыма

Fig. 2. The level of realization of the male gametophyte in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* at the stage of pollen germination for the territory of the Mountainous Crimea

Можно сделать предположение о формировании в среднем поясе урочища Аязьма в весенние месяцы наиболее стабильных погодных условий. Здесь в меньшей степени сказывается действие холодных морских туманов, поступающих с поверхности остывшего за зиму моря, также сравнительно невысок перепад дневных и ночных температур. Это в целом снижает степень негативного внешнего воздействия погодных условий на развитие мужского гаметофита и увеличивает вероятность получения функционально жизнеспособной пыльцы,

что и характеризуется высоким показателем ее окрашивания ацетокармином. В благоприятных условиях при уменьшении давления естественного отбора часть прокрашенных пыльцевых зерен имеет низкий жизненный потенциал, они не способны участвовать в последующих этапах репродуктивного цикла. Поэтому ацетокарминовый тест качества пыльцы лишь частично отражает ее жизненные свойства. Параллельное проращивание пыльцы на питательной среде позволяет оценивать уровень элиминации мужского гаметофита на стадии прорастания.

В верхнем поясе, несмотря на снижение, по данным окрашивания ацетокармином, жизнеспособности пыльцы, уровень ее прорастания на питательной среде был выше в сравнении с насаждениями центральной части массива лесов *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма. Очевидно, здесь в большей степени проявляется действие погодных условий, связанных с градиентом дневных и ночных температур, который в горной местности увеличивается с подъемом над уровнем моря. Ухудшение условий по температурному режиму повышает действие естественного отбора на первых этапах развития мужского гаметофита и вероятность формирования функционально полноценной пыльцы, которая способна успешно прорасти на питательной среде, что отражается индексом  $I_r$ , в верхнем поясе насаждений *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма он увеличился, составив в среднем 0,955.

В нижнем поясе наблюдалось снижение жизнеспособности пыльцы, как по данным окрашивания, так и по данным проращивания, что связано с ухудшением общего состояния древостоев *P. brutia* var. *pityusa* прибрежной зоны в результате негативного воздействия интенсивной неорганизованной рекреации [15]. При этом индекс  $I_r$  пыльцы древостоев на данных территориях был сравнительно высоким, это характеризует определенные возможности реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцевого зерна. *P. brutia* var. *pityusa* является теплолюбивым представителем автохтонной флоры Крыма. Прибрежная зона по климатическим факторам благоприятна для произрастания данного вида в условиях южного берега Крыма. Поэтому отрицательное внешнее влияние на спорофит, связанное с рекреационной деятельностью: нарушение почвенного покрова, усиление эрозионных процессов, физическое повреждение растений – пока еще не снижает возможности развития мужских репродуктивных структур. В нижнем поясе пыльца *P. brutia* var. *pityusa* формирует наиболее длинные пыльцевые трубки в древостоях урочища Аязьма – в среднем 148,0 мкм. С увеличением высоты над уровнем моря показатель снижается, коэффициент корреляции  $r = -0,951$ . Вероятно, это связано с изменением климатических условий. Для южного берега Крыма с подъемом по высоте на 110 м над ур. м. среднегодовая температура уменьшается на 1 °C [8]. Между нижними и верхними участками массива лесов *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма градиент среднегодовой температуры составляет 2–3 °C. Это отражается на развитии мужского гаметофита, с ухудшением климатических условий возрастают функциональные затраты на преадаптацию, что снижает энергетические возможности пыльцы при формировании пыльцевых трубок [13, 22].

Урочище Батилиман по климатическим условиям является наиболее благоприятным местом для произрастания *P. brutia* var. *pityusa*. Большая высота скального массива – до 630 м над ур. м., закрывающего территорию с

севера, определяет повышение температурного фона и сглаживание его сезонной динамики. В урочище совместно с *P. brutia* var. *pityusa* произрастает *Arbutus andrachne* L. – теплолюбивое вечнозеленое растение, представитель средиземноморской флоры, который в других насаждениях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма не встречается. Повышение температурного фона также связано с преобладанием в структуре ландшафта урочища Батилиман склонов южной экспозиции – 92 %, только 8 % имеют юго-восточную ориентацию. Весной 2022 г. наиболее ранний вылет пыльцы отмечался на данном объекте исследования. Более теплый климат начала вегетационного периода обусловил повышение качества пыльцы *P. brutia* var. *pityusa*. Наблюдалось увеличение показателей ее окрашивания и прорастания на питательной среде. Средние значения индекса  $I_r$  на высоте 50 и 120 м над ур. м. были 0,958 и 0,953 соответственно, что говорит о росте реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы. Средняя длина пыльцевых трубок в нижнем поясе насаждений *P. brutia* var. *pityusa* урочища составила 160,3 мкм – на 8,3 % больше в сравнении с аналогичным показателем урочища Аязьма, что также отражает положительное влияние повышения средней температуры на формирование и развитие мужского гаметофита *P. brutia* var. *pityusa* в условиях южного берега Крыма.

В восточной части территории произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму качество пыльцы заметно снижается. Ее средняя жизнеспособность *P. brutia* var. *pityusa* на г. Караул-Оба, определенная окрашиванием, не превышала 82 %, среднее количество проросшей пыльцы изменялось в пределах 70–74 %. Индексы  $I_r$  и длина пыльцевых трубок также уменьшились, что свидетельствует об ухудшении потенциала реализации мужского гаметофита *P. brutia* var. *pityusa* на стадии прорастания и формирования пыльцевых трубок.

В урочище Новый Свет при некотором увеличении доли окрашенной пыльцы наблюдалось снижение активности ее прорастания на искусственной питательной среде. Индексы  $I_r$  и длина пыльцевых трубок были самыми низкими в сравнении с другими территориями произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму. Значительное снижение уровня прорастания пыльцы и уменьшение длины пыльцевых трубок для нижней части насаждений *P. brutia* var. *pityusa* урочища Новый Свет может быть связано с негативным воздействием поллютантов, поступающих сюда с восходящими воздушными потоками от автомобильной трассы Судак – Новый Свет, расположенной в непосредственной близости от лесного массива. Аэрозоли автомобильных выхлопов, содержащие тяжелые металлы и другие техногенные загрязнители, оказывают ингибирующее действие на прорастание пыльцы и формирование пыльцевых трубок *P. brutia* var. *pityusa*, что отмечается в некоторых исследованиях, связанных с изучением воздействия поллютантов на процессы репродукции лесных насаждений [20, 22].

Одним из факторов снижения качества пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* в восточном районе произрастания является ухудшение условий по тепловому режиму в период ее формирования. По мнению некоторых исследователей, формирование микроспор с предмейотического развития спорогенной ткани, включая мейоз и интерфазу микроспор, до первого проталлиального деления наиболее уязвимо к действию низких температур [12, 13, 16, 18, 27]. Резкие

температурные колебания по степени отрицательного воздействия на развитие мужских генеративных структур сопоставимы с влиянием серосодержащих поллютантов, количество нарушений в мейозе в результате негативного действия температурного фактора может достигать 30 % [10]. Микроспорогенез в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма проходит в 1-й половине весны. Значительный перепад температур в это время, их снижение до отрицательных, оказывают активное воздействие на качество пыльцы. В районе исследования в начале весны 2022 г. наблюдалось 2 резких похолодания (рис. 3).

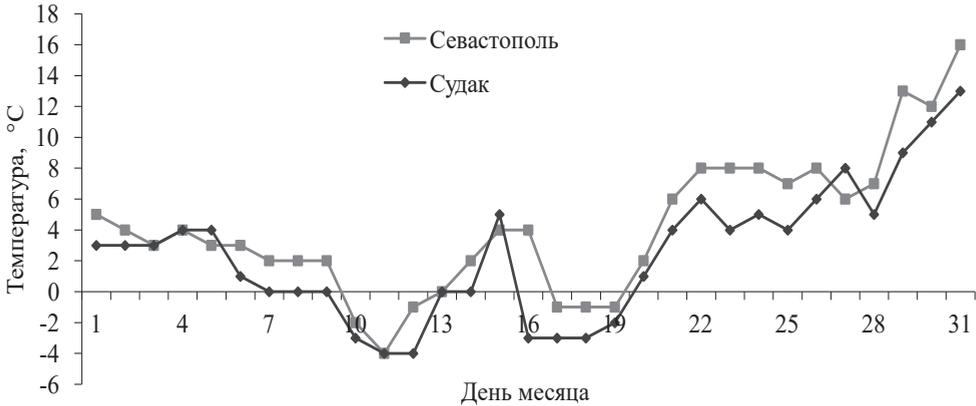


Рис. 3. Среднесуточные температуры в марте 2022 г. в районе проведения исследования

Fig. 3. The average daily temperatures in March 2022 in the study area

Во время 1-го похолодания среднесуточные температуры в Севастопольском районе снизились с 2 °С 9 марта до -4 °С 11 марта и достигли положительных значений 14 марта. В Судакском районе похолодание началось на 2 дня раньше, чем в Севастополе, и продолжалось до 15 марта, при этом действие низких температур (-4 °С) было более длительным. Второе снижение температур началось через день после завершения 1-го. Отрицательные значения наблюдались в течение 3 суток, в восточном районе они оказались на 2 °С ниже. Столь значительные изменения погодных условий заметно повлияли на жизнеспособность пыльцы и длину пыльцевых трубок *P. brutia* var. *pityusa*, также определив увеличение отклонений от нормы размера и формы пыльцевого зерна. Нарушения микроспорогенеза проявлялись в виде формирования очень мелких и крупных пыльцевых зерен, аномального количества летательных мешков: их полной редукции или образования 1, 3 и 4 (рис. 4).

Статистическая оценка аномалий развития пыльцы выявила, что в западной части произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму их заметно меньше в сравнении с восточной (рис. 5). Суммарная средняя доля аномальной пыльцы для западных территорий составила 2,9 %, для восточных - 4,6 %. Скорее всего, это определяется различием климатических условий в период формирования пыльцы, в восточном районе они менее благоприятные [2]. Наблюдается также некоторая тенденция снижения количества отклонений в развитии пыльцы с подъемом по высоте над уровнем моря, что связано с адаптацией микроспорогенеза в верхней части насаждений к более жестким климатическим условиям произрастания и резким перепадам температуры.

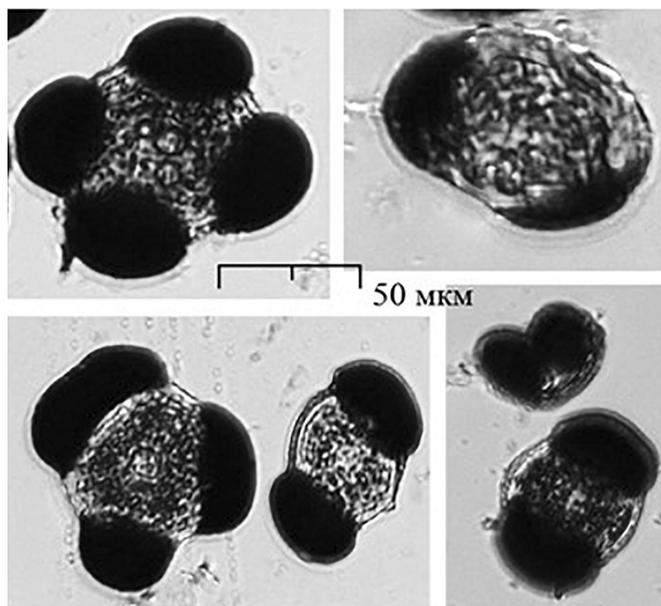


Рис. 4. Нарушения формирования пыльцы в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма

Fig. 4. The violations of pollen formation in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

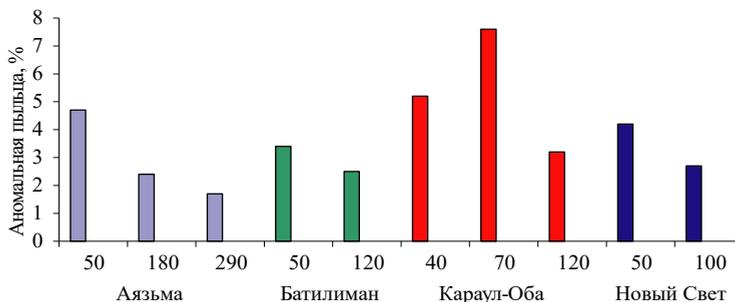


Рис. 5. Доля аномальной пыльцы в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма

Fig. 5. The proportion of abnormal pollen in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

Лимитирующее действие температурного режима на формирование пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* также проявляется в том, что на открытых мысовых территориях, где повышается контраст погодных условий, количество аномалий развития пыльцевого зерна увеличивается. В наибольшей степени данная специфика географического положения проявляется в насаждениях г. Караул-Оба, в их средней части (на высоте 70 м над ур. м.) доля нарушений размера и формы пыльцевого зерна *P. brutia* var. *pityusa* составила 7,6 %. На высоте 40 и 120 м над ур. м. данный показатель был соответственно 5,2 и 3,2 %.

#### Заключение

В западной части произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму качество пыльцы более высокое в сравнении с пыльцой деревьев восточных

территорий. В насаждениях *P. brutia* var. *pityusa* урочища Батилиман жизнеспособность пыльцы варьировала в пределах 92–98 %, длина пыльцевых трубок – 140–160 мкм. На г. Караул-Оба средняя жизнеспособность пыльцы не превышала 82 %, средняя длина пыльцевых трубок – 125 мкм. В урочище Новый Свет при некотором увеличении доли окрашенной пыльцы наблюдалось снижение активности ее прорастания на искусственной питательной среде.

Изучение свойств пыльцы методом проращивания на искусственной питательной среде выявило некоторое уменьшение уровня ее жизнеспособности по сравнению с результатами ацетокарминового тестирования, различия составили 4–9 %. Использование 2 способов анализа жизнеспособности пыльцы: окрашивание ацетокармином и проращивание на искусственной питательной среде – позволяет оценивать уровень элиминации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцевого зерна.

Статистическая оценка аномалий развития пыльцы выявила, что в западной части произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму их заметно меньше в сравнении с восточной. Суммарный средний показатель аномальной пыльцы для западных территорий составил 2,9 %, для восточных – 4,6 %, что связано с различием климатических условий в период формирования пыльцы, в восточном районе они менее благоприятные. Лимитирующее действие температурного режима на формирование и развитие пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* усиливается на открытых мысовых территориях, где повышается контраст погодных условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 512 с.  
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnays promyshlennost' Publ., 1982. 512 p. (In Russ.).
2. Бастаева Г.Т., Лявданская О.А., Малахов С.В., Гордеев Д.С. Аномалии пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Платовской лесной даче Оренбургской области // Аграр. наука – 2022: материалы Всерос. конф. молодых исследователей. М.: Рос. гос. аграр. ун-т – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. С. 253–255.  
Bastaeva G.T., Lyavdanskaya O.A., Malakhov S.V., Gordeev D.S. Pollen Anomalies of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Platovskaya forest dacha, the Orenburg Region. *Agrarian Science – 2022: Proceedings of the All-Russian Conference of Young Researchers*. Moscow, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2022, pp. 253–255. (In Russ.).
3. Велисевич С.Н. Качество пыльцы высокогорных популяций *Pinus sibirica* Du Tour (*Pinaceae*) в аридных и гумидных районах Алтая // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Биология. 2017. Т. 10, № 3. С. 301–311.  
Velisevich S.N. Pollen Quality of *Pinus sibirica* Du Tour (*Pinaceae*) Mountain Populations in Arid and Humid Regions of Altai. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya* = Journal of Siberian Federal University. Series: Biology, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 301–311. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0014>
4. Голубинский И.Н. Биология прорастания пыльцы. Киев: Нукова думка, 1974. 368 с.  
Golubinskij I.N. *Biology of Pollen Germination*. Kyiv, Nukova dumka Publ., 1974. 368 p. (In Russ.).
5. Камелин Р.В. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2008. 885 с.

Kamelin R.V. *Red Data Book of the Russian Federation (Plants and Fungi)*. Moscow, KMK Publ. House, 2008. 885 p. (In Russ.).

6. Коба В.П. Исследование некоторых особенностей морфогенеза и прорастания пыльцы *Pinus pallasiana* D. Don // Цитология и генетика. 2004. Т. 38, № 3. С. 38–45.

Koba V.P. Study of Some Characters of Morphogenesis and Germination of *Pinus pallasiana* D. Don Pollen. *Tsitologiya i genetika* = Cytology and Genetics, 2004, vol. 38, no. 3, pp. 38–45. (In Russ.).

7. Коршиков И.И., Лантева Е.В., Литвиненко Ю.С. Морфологические изменения пыльцы сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) в интродукционных насаждениях техногенно загрязненных территорий // Пром. ботаника. 2014. Т. 14. С. 61–68.

Korshikov I.I., Lapteva Ye.V., Litvinenko Yu.S. Pollen Morphology Changes in *Pinus pallasiana* D. Don Introduced Stands from Technogenic Polluted Areas. *Promyshlennaya Botanika* = Industrial Botany, 2014, vol. 14, pp. 61–68. (In Russ.).

8. Кочкин М.А. Почвы, леса и климат горного Крыма и пути их рационального использования. М.: Колос, 1967. 366 с.

Kochkin M.A. *Soils, Forests and Climate of Mountainous Crimea and Ways of Their Rational Use*. Moscow, Kolos Publ., 1967. 366 p. (In Russ.).

9. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 350 с.

Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 350 p. (In Russ.).

10. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с.

*Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p. (In Russ.).

11. Махнева С.Г., Менищиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // Лесн. вестн. Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 1. С. 32–44.

Makhneva S.G., Menshchikov S.L. Common Pine (*Pinus sylvestris* L.) Pollen Quality in JSC “Karabashmed” Emission Zone. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-32-44>

12. Некрасова Т.П. Влияние температуры воздуха на формирование пыльцы хвойных древесных пород // Лесоведение. 1976. № 6. С. 975–978.

Nekrasova T.P. The Influence of Air Temperature on the Formation of Coniferous Tree Pollen. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1976, no. 6, pp. 975–978. (In Russ.).

13. Некрасова Т.П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 169 с.

Nekrasova T.P. *Pollen and Pollen Regime of Siberian Conifers*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 169 p. (In Russ.).

14. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988, 271 с.

Pausheva Z.P. *Practical Training in Plant Cytology*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 271 p. (In Russ.).

15. Плугатарь Ю.В., Коба В.П., Панельбу В.В., Новицкий М.А., Макаров Н.А. Некоторые свойства почв и типологическая структура насаждений *Pinus pityusa* (Pinaceae) Горного Крыма // Земледелие. 2021. № 7. С. 15–21.

Pluhatar Yu.V., Koba V.P., Papelbon V.V., Nowicki M.A., Makarov N.A. Some Soil Properties and Typological Structure of *Pinus pityusa* (Pinaceae) Plantings in Mountain Crimea. *Zemledelie*, 2021, no. 7, pp. 15–21. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-7-15-21>

16. Подгорный Ю.К., Ругузов И.А. Особенности микроспорогенеза и развития мужского гаметофита сосны крымской в связи с семеношением и жизнеспособностью популяций // Бюл. Никит. ботан. сада. 1979. Т. 38. С. 21–25.

Podgorny Yu.K., Ruguzov I.A. Features of Microsporogenesis and Development of Male Gametophyte of Crimean Pine in Connection with Seed Production and Viability of Populations. *Bulliten' gosudarstvennogo Nikitskogo Botanicheskogo sada* = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens, 1979, vol. 38, pp. 21–25. (In Russ.).

17. Surso M.V., Chukhchin D.G. Рост и развитие пыльцевой трубки можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis*): роль ядра клетки трубки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 20–34.

Surso M.V., Chukhchin D.G. Growth and Development of Pollen Tubes in Common Juniper (*Juniperus communis*): the Role of the Tube Cell Nucleus. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 2, pp. 20–34. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-20-34>

18. Третьякова И.Н., Носкова Н.Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. Т. 1. С. 26–33.

Tretyakova I.N., Noskova N.E. Scotch Pine Pollen under Conditions of Environmental Stress. *Ecologiya* = Russian Journal of Ecology, 2004, vol. 35, pp. 20–26.

<https://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000011105.90297.07>

19. Эрдынеева С.А., Ширеторова В.Г., Раднаева Л.Д. Фармакогностическое исследование пыльцы *Pinus sylvestris* L. и *Pinus pumila* (Pall) Regel // Вопр. биол., мед. и фармацевтич. химии. 2021. Т. 24, № 2. С. 29–34.

Erdyneeva S.A., Shiretorova V.G., Radnaeva L.D. Pharmacognostic Study of the Pollen of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus pumila* (Pall) Regel. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoj i farmatsevticheskoy khimii* = Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 29–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-02-05>

20. Коба В.П. Вміст важких металів у пилку сосни кримської у зв'язку з висотною поясністю зростання // Физиология и биохимия культурных растений. 2004. Т. 36, № 5. С. 410–418.

Koba V.P. Heavy Metal Content in Crimean Pine Pollen in Relation to Altitudinal Zonality of Growth. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rastenij* = Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants, 2004, vol. 36, no. 5, pp. 410–418. (In Ukr.).

21. Christophoulou A., Sazeides C.I., Fyllas N.M. Size-Mediated Effects of Climate on Tree Growth and Mortality in Mediterranean Brutia Pine Forests. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 812, art. no. 151463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151463>

22. Jaconis S.Y., Culley T.M., Meier A.M. Does Particulate Matter along Roadsides Interfere with Plant Reproduction? A Comparison of Effects of Different Road Types on *Cichorium intybus* Pollen Deposition and Germination. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 222, pp. 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.047>

23. Kukarskih V.V., Devi N.M., Surkov A.Y., Bubnov M.O., Gorlanova L.A., Ekba Y.A., Hantemirov R.M. Climatic Responses of *Pinus brutia* along the Black Sea Coast of Crimea and the Caucasus. *Dendrochronologia*, 2020, vol. 64, pp. 125763. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125763>

24. Liu S., Li Z., Wu S., Wan X. The Essential Roles of Sugar Metabolism for Pollen Development and Male Fertility in Plants. *The Crop Journal*, 2021, vol. 9, iss. 6, pp. 1223–1236. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.08.003>

25. López-Sáez J.A., Camarero J.J., Abel-Schaad D., Luelmo-Lautenschlaeger R., Pérez-Díaz S., Alba-Sánchez F., Carrión J.S. Don't Lose Sight of the Forest for the Trees! Discerning Iberian Pine Communities by Means of Pollen-Vegetation Relationships. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2020, vol. 281, art. no. 104285. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2020.104285>

26. McCulloch R.D., Mathiasen P., Premoli A.C. Palaeoecological Evidence of Pollen Morphological Changes: a Climate Change Adaptation Strategy? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, vol. 601, art. no. 111157. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111157>

27. Mog B., Veena G.L., Adiga J.D., Hebbar K.B., Shamsudheen M., Manjesh G.N., Eradasappa E., Mohana G.S., Thandaiman V., Vanitha K., Yadav A.K. Pollen Morphological Study and Temperature Effect on the Pollen Germination of Cashew (*Anacardium occidentale* L.) Varieties. *Scientia Horticulturae*, 2023, vol. 314, art. no. 11957.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111957>

28. Tadoumant S., Bouimetarhan I., Baqloul A., Hssaisoune M., Reddad H., Bouchaou L. Modern Pollen Distribution and its Relationship with Environmental Gradient in Southern Morocco. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2022, vol. 298, art. no. 104595.

<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104595>

29. Williams J.H., Reese J.B. Chapter Twelve – Evolution of Development of Pollen Performance. *Current Topics in Developmental Biology*, 2019, vol. 131, pp. 299–336.

<https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2018.11.012>

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

Научная статья

УДК 630\*24

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-38-50

## Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода

Г.Э. Рего<sup>1</sup>, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [AFX-5848-2022](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2235-8113>

О.И. Григорьева<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

И.В. Григорьев<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

А.М. Воронова<sup>4</sup>, канд. техн. наук; *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-9567-6421>

И.С. Должиков<sup>4</sup>, канд. техн. наук; *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

В.П. Друзьянова<sup>5</sup>, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

<sup>1</sup>Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; [regogr@yandex.ru](mailto:regogr@yandex.ru)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru)

<sup>3</sup>Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru)

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; [idolzhikov222@mail.ru](mailto:idolzhikov222@mail.ru)

<sup>5</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, д. 58, ул. Белинского, г. Якутск, Россия, 677000; [druzvar@mail.ru](mailto:druzvar@mail.ru)

Поступила в редакцию 11.11.23 / Одобрена после рецензирования 04.02.24 / Принята к печати 07.02.24

**Аннотация.** В настоящее время качественный состав эксплуатационных лесных массивов возраста спелости и подходящих к нему часто является неудовлетворительным. Во многом это связано с отсутствием рубок ухода или их неправильным проведением. Производительность лесосечных работ при рубках ухода мала, получаемая древесина в большинстве случаев оказывается невостребованной. Механизация рубок ухода неудобна с производственной точки зрения и экономически невыгодна. Вместе с тем в Российской Федерации есть примеры внедрения передовых зарубежных практик осуществления рубок ухода машинным способом с использованием харвестера и форвадера. Применение этого способа позволяеткратно повысить производительность. Удельные затраты ( $\text{p}/\text{м}^3$ ) здесь больше затрат на сплошные рубки спелых и перестойных насаждений, однако зачастую меньше, чем при работе вальщиков леса. Еще больше повысить эффективность работы машинных лесозаготовительных комплексов при проведении рубок ухода возможно за счет автоматизации отбора деревьев в рубку. В основу такого отбора необходимо положить главную задачу данного вида рубок – получение наиболее оптимальных по размерно-качественным признакам насаждений к возрасту их спелости. Это становится возможным при учете конкурентной борьбы древесных растений в насаждении до и после проведения рубок ухода. В статье введена математическая постановка задачи назначения деревьев в рубку в однородном насаждении. Показано, что число вариантов решения растет экспоненциально. Реализован алгоритм, базирую-

щийся на жадном методе, и выполнено экспериментальное сравнение этого метода со случайным результатом, а также с удалением дерева, имеющего самого близкого соседа среди всех деревьев. Апробация алгоритма на экспериментальных данных показала, что он эффективнее двух других.

**Ключевые слова:** рубки ухода за лесом, отбор деревьев в рубку, математическое моделирование, жадный алгоритм, полный взвешенный граф, критерии оптимизации

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» и за счет гранта РНФ № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

**Для цитирования:** Рего Г.Э., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Воронова А.М., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Математическая модель отбора деревьев в однородном насаждении при проведении рубок ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 38–50. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-38-50>

Original article

## A Mathematical Model of Tree Selection in a Homogeneous Plantation during Improvement Thinning

**Grigoriy E. Rego**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AFX-5848-2022](https://orcid.org/0000-0002-2235-8113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2235-8113>

**Olga I. Grigoreva**<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

**Igor V. Grigorev**<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

**Anna M. Voronova**<sup>4</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9567-6421>

**Ilya S. Dolzhikov**<sup>4</sup>, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

**Varvara P. Druzyanova**<sup>5</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; [regogr@yandex.ru](mailto:regogr@yandex.ru)

<sup>2</sup>Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskii per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru)

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru)

<sup>4</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; [idolzhikov222@mail.ru](mailto:idolzhikov222@mail.ru)

<sup>5</sup>North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; [druzvar@mail.ru](mailto:druzvar@mail.ru)

---

Received on November 11, 2023 / Approved after reviewing on February 4, 2024 / Accepted on February 7, 2024

---

**Abstract.** Currently, the qualitative composition of merchantable forests of maturity age and approaching it is often unsatisfactory. This is largely due to the lack of improvement thinning or its improper carrying out. The productivity of logging operations during improvement thinning is low, and the resulting timber in most cases turns out to be unclaimed. Mechanization of improvement thinning is inconvenient from a production point of view and economically unprofitable. At the same time, in the Russian Federation there are ex-

amples of the implementation of advanced foreign practices of improvement thinning by machine using a harvester and a forwarder. The use of this method allows for a multiple increase in productivity. The unit costs (rub/m<sup>3</sup>) in this case are higher than the costs of clear cutting of mature and overmature plantations, but often lower than when felling forests. It is possible to further increase the efficiency of machine logging complexes during improvement thinning operations by automating the selection of trees for logging. The basis for such selection should be the main objective of this type of logging – obtaining the most optimal size and quality characteristics of plantations by the age of their maturity. This becomes possible when taking into account the competition of woody plants in the plantation before and after improvement thinning. The article introduces a mathematical formulation of the problem of assigning trees for logging in a homogeneous plantation. It is shown that the number of possible solutions is growing exponentially. An algorithm based on the greedy method is implemented, and an experimental comparison of this method with a random result, as well as with the removal of a tree with the closest neighbour among all trees, is performed. Testing the algorithm on experimental data has shown that it is more effective than the other two.

**Keywords:** improvement thinning, selection of trees for logging, mathematical modeling, greedy algorithm, complete weighted graph, optimization criteria

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative Developments in the Field of Logging Industry and Forestry” and at the expense of the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

**For citation:** Rego G.E., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Voronova A.M., Dolzhikov I.S., Druzyanova V.P. A Mathematical Model of Tree Selection in a Homogeneous Plantation during Improvement Thinning. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 38–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-38-50>

### Введение

Процесс роста и развития древостоя регулируется конкурентными отношениями в популяции. Под конкуренцией подразумевают в т. ч. взаимодействия между организмами. Она может быть внутривидовая и межвидовая, активная и пассивная [11, 17]. В процессе такой борьбы деревья в насаждении разделяются на классы – классы Крафта.

Растения в индивидуальном развитии конкурируют между собой в основном за ресурсы окружающей среды, такие как свет, влага и элементы почвенного питания. Свет всегда присутствует в жизни растений, только в разной степени и может регулироваться в процессе роста насаждения путем изменения его густоты. Плодородие почвы, как правило, относительно постоянно. Лесные почвы в основном бедные и кислые, и количество доступных для использования растениями элементов в них ограничено [6]. Поэтому конкуренция за почвенные ресурсы более напряженная и зависит от площади питания каждого растения [8, 9, 16, 22]. С лесохозяйственной точки зрения необходимо знать механизмы межвидовых и внутривидовых взаимоотношений, динамику их развития. Известно, что внутривидовая конкуренция острее, чем межвидовая. Управление процессом изреживания позволяет сформировать насаждения с заданными характеристиками, такими как состав, полнота, запас, а главное, товарная структура [1–5].

Рубки ухода позволяют заменить естественный отбор искусственным посредством осуществления человеком отбора деревьев в рубку. И здесь важны критерии назначения деревьев в рубку и на доращивание: класс Крафта, санитарное состояние дерева, наличие или отсутствие механических дефектов, принадлежность к целевой древесной породе [18–21]. Обязательно учитывать также расположение деревьев относительно друг друга. Конкурентные отношения между деревьями одного вида, как было сказано выше, зависят от площади питания. Отсюда вытекает несколько вопросов с точки зрения фитоценотического и практического лесоводственного подходов [3, 7, 28]: о влиянии соседних деревьев друг на друга, о механизмах их дифференциации на господствующие и отстающие, о расположении относительно остальных с учетом оптимальности товарной и биологической структуры.

С точки зрения конкурентных отношений оставляемых на доращивание после проведения рубок ухода деревьев наиболее рациональным, при прочих равных условиях, является предусмотрение между ними максимально возможного расстояния.

В настоящее время достаточно распространенная практика в лесном хозяйстве – составление подеревного плана насаждения с указанием координат растущих деревьев и их некоторых характеристик (порода, диаметры), что делается при помощи технологии LIDAR. В зависимости от объемов измерений, требуемой точности и производительности такие данные можно получить посредством лазерного сканирования: наземного, мобильного, воздушного.

При наземном лазерном сканировании (рис. 1, а) оператор сканера движется по визуально намеченным параллельным ходам, расстояние между которыми 10–15 м. Метод напоминает технологию сплошного перече́та деревьев на лесосеке, но имеет в 2–3 раза бóльшую производительность – 5–7,5 га за смену, а иногда и до 15 га. При реализации данного метода не требуется постоянный спутниковый GNSS-сигнал. Также это метод позволяет получить максимальную точность. Однако некоторые затруднения могут представлять подрост и подлесок.

При мобильном лазерном сканировании используется мобильная станция, объединяющая лазерный сканер, инерциальную систему и приемник GNSS-сигнала. Станция может перемещаться, например, на небольшом колесном или гусеничном вездеходном средстве, таком как мини-трактор [10]. Способ характеризуется значительно большей производительностью по сравнению с наземным сканированием, но дает меньшую точность (сложно определить диаметр деревьев), а также требует открытого неба для корректного GNSS-позиционирования.

Воздушное лазерное сканирование (рис. 1, б) максимально производительное, но обладает меньшей точностью (кривизна стволов обуславливает ошибку при определении их координат). Также при его реализации следует учитывать нормативные аспекты использования беспилотных летательных аппаратов. Большим достоинством метода является возможность определения объема кроны, что в дальнейшем позволит прогнозировать трудоемкость по очистке лесосеки, а также принимать решение о дальнейшем эффективном применении порубочных остатков [23, 24].



Рис. 1. Подеревная съемка насаждения при помощи технологии LIDAR:  
*a* – наземное сканирование; *б* – воздушное

Fig. 1. The tree-by-tree survey of a plantation using the LIDAR technology:  
*a* – ground scanning; *b* – aerial

Рассмотренные варианты подеревной съемки при помощи технологии LIDAR дают возможность получить данные о координатах деревьев и их характеристиках в уже сформировавшемся насаждении. При создании искусственных насаждений, в т. ч. лесных плантаций, некоторые отечественные и зарубежные лесопользователи устанавливают GPS-метки каждого размещенного на территории сеянца (саженца) с закрытой корневой системой при машинном способе посадки (рис. 2) [13, 26, 29, 30].

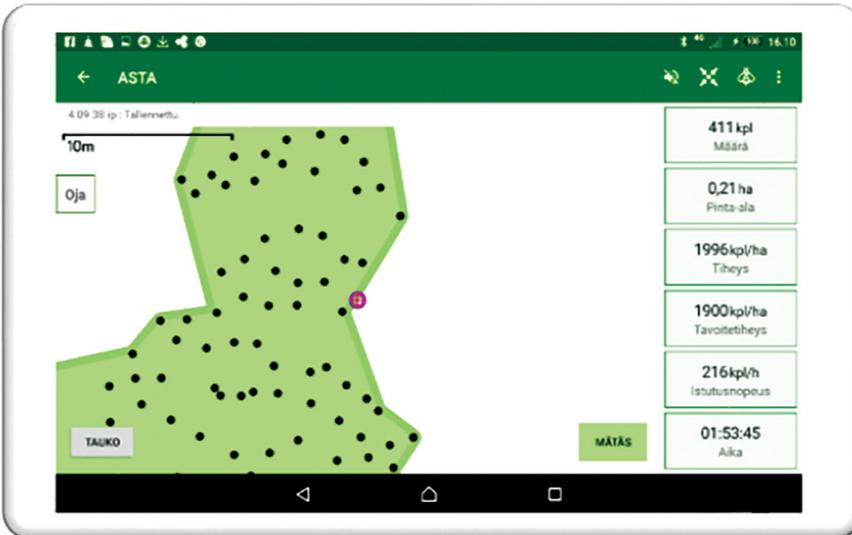


Рис. 2. Схема размещения посадочного материала на мониторе компьютера посадочной машины

Fig. 2. The layout of the planting material on the computer monitor of the planting machine

Практика подеревной лазерной съемки, или получения координатной карты посадки, позволяет достигнуть многих целей цифровизации лесного хозяйства [12, 14, 15], в т. ч. частично автоматизировать процесс отбора деревьев в рубку с заданием и загрузкой в бортовой компьютер лесозаготовительной машины координат выбираемых деревьев. В дальнейшем предполагается использовать программу на современной лесозаготовительной технике. Это существенно повысит эффективность рубок ухода, с точки зрения как достижения оптимума состава древостоя после рубки, так и рентабельности маршрутов движения лесозаготовительной машины и транспортного освоения лесосеки (расположения трелевочных волоков и технологических коридоров).

Для этого необходимо обосновать алгоритмы и разработать модели для расчета оптимального расстояния между деревьями в зависимости от их характеристик, таких как размещение в древостое, диаметр, порода. Зная диаметр дерева, всегда можно вычислить абсолютную полноту насаждения и интенсивность рубки.

Цель данного этапа исследований – математическая постановка задачи, обоснование наилучшего алгоритма отбора деревьев в рубку.

Объектом исследования стали материалы подеревной съемки при помощи технологии LIDAR лесного массива в Республике Татарстан вблизи г. Набережные Челны.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Перейдем к формальной постановке задачи. Будем считать, что лесосека представляет собой замкнутый многоугольник  $P$  без дыр. Пусть имеется  $n$  деревьев и требуется оставить после выборочной рубки  $m$  из них ( $m < n$ ). Деревья смоделируем при помощи кругов, целиком находящихся в многоугольнике  $P$ . Круги далее будем называть деревьями. Каждое дерево имеет радиус  $r_i$ .

Рассмотрим полный взвешенный граф  $G = (V, E)$ , где  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ , вершины  $v_i \in V$  соответствуют деревьям, а ребра  $e_{ij} \in E$  – парам деревьев  $v_i$  и  $v_j$ . Полнота графа означает, что все вершины попарно соединены между собой ребрами. Вес  $w_{ij}$  ребра  $e_{ij}$  равен расстоянию между соответствующими концам ребра деревьями:

$$w_{ij} = d(v_i, v_j) - r_i - r_j,$$

где  $d(v_i, v_j)$  – расстояние между центрами кругов, которым соответствуют вершины  $v_i$  и  $v_j$ ;  $r_i, r_j$  – радиусы деревьев  $i$  и  $j$ .

Требуется выбрать подмножество вершин  $V' \subseteq V$ , состоящее из  $m$  элементов, соответствующих оставленным после выборочной рубки деревьям. Обозначим как  $G' = (V', E')$  подграф, порожденный множеством  $V'$ , где  $E' \subseteq E$  – множество ребер графа  $G$ , соединяющих вершины подмножества  $V'$ .

Для решения исходной задачи можно использовать различные критерии оптимизации. Мы предлагаем максимизировать сумму весов ребер в подграфе  $G'$ :

$$\sum_{e_{ij} \in E'} w_{ij} \rightarrow \max.$$

Это удовлетворяет требованию максимизации суммарного расстояния между центрами оставшихся деревьев.

Всего есть

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

вариантов выбора  $m$  подмножеств вершин для формирования множества  $V'$ , что влечет экспоненциальную сложность решения данной задачи методом полного перебора. Чтобы этого не делать и ускорить процесс решения, предлагается следующий жадный эвристический алгоритм.

*Жадный алгоритм для решения задачи поиска индуцированного графа с максимальной суммой весов вершин.* Жадные алгоритмы являются популярным методом решения различных задач, в т. ч. на графах, например, для поддержания ориентации ребер динамического графа [25, 27], поиска минимального остовного дерева [31] или расчета схем транспортных маршрутов на вырубке [29]. Опишем алгоритм жадного метода для данной задачи.

В рамках жадного метода можно подсчитать сумму весов ребер всех вершин и удалять на каждом шаге вершину, сумма весов инцидентных ребер которой минимальна.

Пример построения алгоритма выглядит так:

**Вход:**  $G = (V, E)$ ,  $r_i \rightarrow v_i$ ,  $|V'|$ .

**Выход:**  $V'$  и  $\sum_{w_i \in W_w} w_i$  – множество оставшихся в графе вершин и сумма весов всех ребер графа  $G$  соответственно

Begin

1. While  $|V'| \neq |V|$  do

2. Инициализировать множество весов  $W_E: W_E = |E|$

3. Инициализировать множество  $W_V: W_V = |V|$ , где каждый элемент

соответствует суммарному весу отдельной вершины  $w_i = \sum_{j=1}^{|V|} w_{ij}$ ,  $w_{ij} \in W_E$

4. Удалить из  $V$  вершину  $v'$ , для которой  $w_{v'} = \min(W_V)$ , и все инцидентные ей ребра.

End

Жадный алгоритм конечен, т. к. он делает ограниченное число итераций  $|V| - |V'|$ . Временную сложность алгоритма можно оценить как  $O(|V| \cdot |V|)$ . Для каждой вершины требуется найти сумму расстояний до всех остальных вершин. Эта операция также имеет временную сложность  $O(|V| \cdot |V|)$ . Удаление вершины из графа и обновление сумм расстояний занимает  $O(|V|)$ , потому что нужен не пересчет всех сумм, а только вычитание из каждой расстояний  $w_i$  расстояния  $w_{ij}$  до удаляемой вершины  $j$ .

*Апробация работы алгоритма на данных перечетной ведомости.* Для проверки эффективности работы алгоритма были использованы данные перечетной ведомости для однородного насаждения в пригороде Набережных Челнов (рис. 3). Под однородным насаждением здесь понимается насаждение, состоящее из одной породы или с примесью другой меньше 10 %. Состав насаждения – 10Лп+Кл, возраст – 30 лет, бонитет – I. Каждое дерево в ведомости представляет собой пару координат  $(x, y)$  в метрах в местной системе координат для Набережных Челнов с указанием его диаметра в метрах. Проводилось сравнение удаления дерева с наименьшим общим расстоянием со случайным результатом и с удалением одного дерева из пары самых близких деревьев.

В последнем случае вырубке подлежало дерево с меньшей суммой расстояний до всех остальных деревьев.

№ точки	X, м	Y, м	Порода дерева	Диаметр D, м
1	482139,554	2323853,05	липа	0,25
2	482137,96	2323857,75	липа	0,40
3	482140,336	2323857,165	липа	0,25
4	482138,238	2323861,457	липа	0,40
5	482144,11	2323854,802	липа	0,30
6	482144,424	2323857,75	клен	0,14
7	482143,52	2323860,03	клен	0,13
8	482146,198	2323861,843	липа	0,40
9	482144,815	2323870,337	липа	0,50
10	482142,006	2323868,766	липа	0,35
11	482141,191	2323868,92	липа	0,25
12	482137,513	2323873,953	липа	0,40

Рис. 3. Пример результатов подервной съемки, используемых при моделировании

Fig. 3. An example of tree survey results used in modeling

Выборка содержала 1000 деревьев. На каждой итерации формировалась выборка из 100 случайных деревьев. Выбор любого дерева был равновероятен. Из 100 деревьев одним из описанных способов в 1-й серии экспериментов удалялись 10 и во 2-й – 20 (см. таблицу). Полученный результат (сумма всех попарных расстояний) сохранялся, и производился новый запуск алгоритма. Всего было выполнено 1000 запусков каждой эвристики.

#### Статистические характеристики результатов экспериментов

#### The statistical characteristics of the experimental results

Вид эвристики	Суммарное расстояние между всеми парами вершин		Среднеквадратичное отклонение суммарного расстояния между всеми парами вершин
	среднее	медианное	
<i>При 10 удаляемых деревьях</i>			
Жадный метод	314 096,35	313 930,03	14 395,35
Случайный метод	297 170,26	297 319,13	14 673,41
Метод ближайшего соседа	282 666,67	282 469,88	14 743,44
<i>При 20 удаляемых деревьях</i>			
Жадный метод	261 387,42	262 066,41	11 441,08
Случайный метод	234 610,57	235 346,60	12 284,21
Метод ближайшего соседа	219 042,78	219 132,16	12 114,11

Жадный метод в среднем показал результат на 5,3, 10,0, 10,0 и 16,0 % лучше случайного метода и метода случайного соседа при 10 удаляемых деревьях и тех же методов при 20 удаляемых деревьях соответственно. Есть основания полагать, что при увеличении числа подлежащих рубке деревьев разрыв между эвристиками будет расти.

Во всех случаях медианное значение отличалось от среднего не более чем на 0,4 %, что говорит о стабильности результатов и отсутствии выбросов.

Диаграмма распределения частот выходных данных для 10 удаляемых деревьев при использовании жадного метода показана на рис. 4. По оси абсцисс откладываются округленные до тысяч суммы попарных расстояний между деревьями по итогам работы одной итерации алгоритма. По оси ординат располагается частота данного результата.

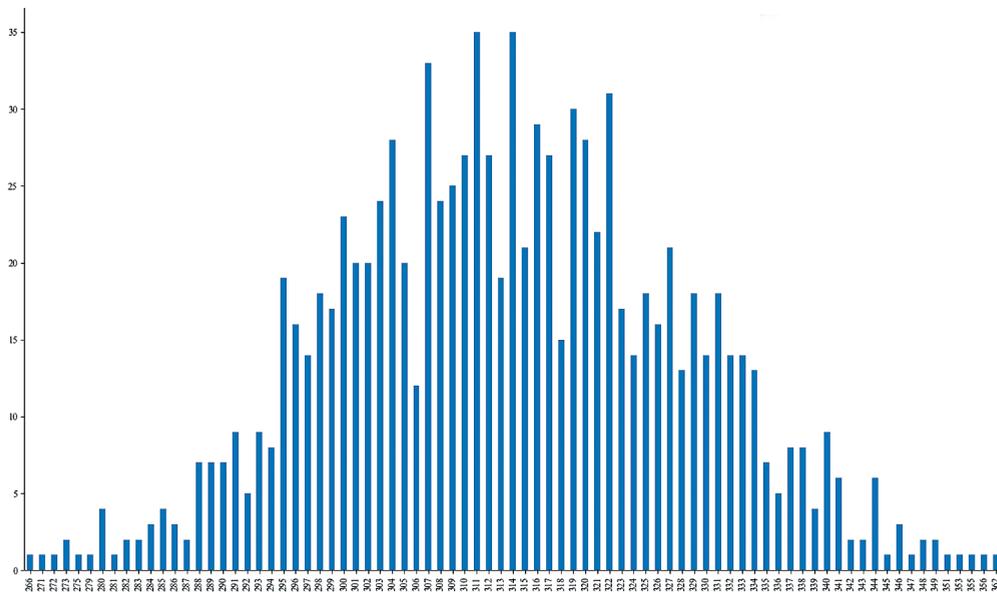


Рис. 4. График частот суммы расстояний между всеми деревьями для жадного метода  
Fig. 4. The frequency curve of the sum of distances between all trees for the greedy method

### Заключение

Рассмотрена проблема повышения эффективности работы машинных лесозаготовительных комплексов при проведении рубок ухода за лесом путем автоматизации отбора деревьев в рубку. Для автоматизации использована по-деревная съемка при помощи технологии LIDAR или известные координаты каждого дерева насаждения, полученные при его искусственном восстановлении. Назначение деревьев в рубку таким способом позволит оптимизировать размещение сети трелевочных волоков (технологических коридоров) на современном этапе технического развития, а в дальнейшем применять беспилотную технику для проведения рассматриваемого вида работ.

Была введена математическая постановка задачи. При расчете расстояний между деревьями учитывался их радиус. Показано, что число вариантов решения растет экспоненциально. Реализован алгоритм, основанный на жадном методе, и проведено экспериментальное сравнение метода со случайным результатом, а также с удалением дерева, имеющего самого близкого соседа среди всех деревьев. Апробация алгоритма на экспериментальных данных выявила, что жадный метод эффективнее двух других.

Данная задача в такой постановке формулируется впервые. Критерий оптимальности является интегральным и оценивает жизненное пространство деревьев в целом. Решение задачи с использованием обозначенного критерия не позволяет оставить деревья на каком-то небольшом участке, срубив все осталь-

ные. Однако у него есть и недостатки. Теоретически решения, оптимальные по этому критерию, могут содержать небольшие плотные скопления деревьев, значительно удаленные от других. Во избежание такой ситуации следовало бы находить решения, в которых деревья «равномерно» удалены друг от друга, но математически такой критерий формулируется сложнее.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть другие критерии оптимальности для данной задачи, такие как максимизация минимального расстояния между парами деревьев, минимизация пересечения зон их влияния друг на друга, а также разделение множества деревьев на кластеры и применение разных критериев для различающихся кластеров. Помимо этого, в текущей постановке задачи не учитывались породы деревьев, хотя, как было сказано выше, межвидовая борьба имеет значительное влияние на прирост деревьев. Этот фактор также планируется учесть в дальнейшем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богачев П.В., Григорьева О.И. Контроль качества и эффективности рубок ухода по нормативам интенсивной модели лесного хозяйства в Тихвинском лесничестве Ленинградской области // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 16–19.

Bogachev P.V., Grigoreva O.I. Control of the Quality and Efficiency of Logging According to the Standards of the Intensive Forestry Model in the Tikhvin Forestry of the Leningrad Region. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 16–19. (In Russ.).

2. Богачев П.В., Григорьева О.И., Григорьев Г.А. Использование абсолютной полноты как критерия качества проведения рубок ухода // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2023. С. 40–41.

Bogachev P.V., Grigoreva O.I., Grigorev G.A. Using Absolute Density as a Criterion for the quality of Improvement Thinning. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Materials of the 9th All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2023, pp. 40–41. (In Russ.).

3. Бузыкин А.И. Устойчивость лесных ценозов в связи с их пространственной структурой и биоразнообразием: НИР: грант № 01-04-48176. Рос. фонд фундамент. исслед., 2001.

Buzykin A.I. *Sustainability of Forest Cenoses in Connection with Their Spatial Structure and Biodiversity*: Research Effort: Grant no. 01-04-48176. The Russian Foundation for Basic Research, 2001. (In Russ.).

4. Григорьева О.И., Панарин А.О. Перспективные пути повышения эффективности рубок ухода в молодняках // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 70–73.

Grigoreva O.I., Panarin A.O. Promising Ways to Improve the Efficiency of Improvement Thinning in Young Stands. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 70–73. (In Russ.).

5. Григорьева О.И., Панарин А.О. Повышение эффективности ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Петрозаводск. гос. ун-т, 2023. С. 61–62.

Grigoreva O.I., Panarin A.O. Improving the Efficiency of Forest Management. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa*: Materials of the 9th All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University, 2023, pp. 61–62. (In Russ.).

6. Карпечко А.Ю. Особенности формирования корней в еловых и смешанных насаждениях после рубок ухода в южной Карелии // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2007. № 17. С. 160–163.

Karpechko A.Yu. Features of Root Formation in Spruce and Mixed Stands after Improvement Thinning in South Karelia. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2007, no. 17, pp. 160–163. (In Russ.).

7. Коротюк О.М. Значение и проблемы рубок ухода // Тр. Братск. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и инженер. науки – развитию регионов Сибири. 2009. Т. 1. С. 142–147.

Korotyuk O.M. The Importance and Problems of Improvement Thinning. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri* = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences for the Development of Siberian Regions, 2009, vol. 1, pp. 142–147. (In Russ.).

8. Кузьмичев В.В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука, 1977. 150 с. Kuz'michev V.V. *Patterns of Stand Growth*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 150 p. (In Russ.).

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

Maslakov E.L. *Formation of Pine Young Stands*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 168 p. (In Russ.).

10. Михайлова Л.М., Куницкая О.А., Мотовилов А.И. Перспективы систем машин на базе средств малой механизации для малообъемных лесозаготовок и лесохозяйственных работ // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М.Е. Николаева (Николаевские чтения). М.: Знание-М, 2022. С. 735–742.

Mikhailova L.M., Kunitskaya O.A., Motovilov A.I. Prospects for Machine Systems Based on Low-Mechanization Tools for Small-Volume Logging and Forestry Operations. *Strategiya i perspektivy razvitiya agrotekhnologij i lesnogo kompleksa Yakutii do 2050 goda*: Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 100th Anniversary of the Formation of the Yakut ASSR and the 85th Anniversary of the First President of the Republic of Sakha (Yakutia) M. E. Nikolaev (Nikolaev Readings), 2022, pp. 735–742. (In Russ.).

11. Михайлова Н.В., Михайлов А.В. Трехмерная упрощенная модель световой конкуренции деревьев в лесу // Математическое моделирование в экологии: материалы Нац. конф. с междунар. участием. Пушино: ИФХиБПП РАН, 2009. С. 178–179.

Mikhailova N.V., Mikhailov A.V. Three-Dimensional Simplified Model of Light Competition of Trees in a Forest. *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii*: Materials of the National Conference with International Participation. Pushchino, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soilscience of the Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 178–179. (In Russ.).

12. Морковина С.С. Финансовое обеспечение цифровой трансформации лесного хозяйства РФ // Актуальные вопросы теории и практики финансово-хозяйственной деятельности: сб. материалов II Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Воронеж: Науч. кн., 2020. С. 109–112.

Morkovina S.S. Financial Support for the Digital Transformation of Forestry in the Russian Federation. *Aktual'nye voprosy teorii i praktiki finansovo-khozyajstvennoj deyatel'nosti*: Collection of Materials of the 2nd All-Russian (National) Scientific and Practical Conference. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2020, pp. 109–112. (In Russ.).

13. Морковина С.С., Панявина Е.А., Авдеева И.А. Исследование системы нормирования в лесном хозяйстве России // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 176–187.

Morkovina S.S., Panyavina E.A., Avdeeva I.A. Study of the System of Rationing in Forestry of Russia. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 176–187. (In Russ.). [https://doi.org/10.12737/article\\_5c9201723dbb21.63764253](https://doi.org/10.12737/article_5c9201723dbb21.63764253)

14. Морковина С.С., Топчиев А.Н. Цифровизация в лесном секторе: перспективы и потенциал // Современные тенденции развития менеджмента и государственного управления: материалы межрегион. заочн. науч.-практ. конф.: в 2 т. / под ред. А.В. Полянина. Орел: Среднерус. ин-т управления – филиал РАНХиГС, 2019. С. 125–127.

Morkovina S.S., Topcheev A.N. Digitalization in the Forestry Sector: Prospects and Potential. *Sovremennye tendentsii razvitiya menedzhmenta i gosudarstvennogo upravleniya*: Materials of the Interregional Correspondence Scientific and Practical Conference: in 2 vol. Ed. by A.V. Polyinin. Oryol, Central Russian Institute of Management – Branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 2019, pp. 125–127. (In Russ.).

15. Морковина С.С., Шанин И.И. Применение цифровых технологий в лесном комплексе // Вызовы цифровой экономики: развитие комфортной городской среды: тр. III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Брянск: Брянск. гос. инженер.-технол. ун-т, 2020. С. 553–555.

Morkovina S.S., Shanin I.I. Application of Digital Technologies in the Forestry Complex. *Yzovy tsifrovoj ekonomiki: razvitie komfortnoj gorodskoj sredy*: Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, 2020, pp. 553–555. (In Russ.).

16. Рубцов М.В. Структурная трансформация монодоминантных сообществ древостоев в возрастной динамике: НИР: грант № 96-04-49836. Российский фонд фундаментальных исследований, 1996.

Rubtsov M.V. *Structural Transformation of Monodominant Forest Stand Communities in Age Dynamics*: Research Effort: Grant no. 96-04-49836. The Russian Foundation for Basic Research, 1996. (In Russ.).

17. Секretenko О.П., Грабарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоев методами случайных точечных полей // Сиб. лесн. журн. 2015. № 3. С. 32–44.

Sekretenko O.P., Grabarnik P.Y. Analysis of Tree Stand Horizontal Structure Using Random Point Field Methods. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 3, pp. 32–44. (In Russ.).

18. Сеннов С.Н. Динамика еловых древостоев разного происхождения // Лесоведение. 1992. № 1. С. 3.

Sennov S.N. Dynamics of Spruce Stands of Different Origins. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1992, no. 1, p. 3. (In Russ.).

19. Сеннов С.Н. Итоги экспериментального изучения конкуренции в древостоях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1993. № 11. С. 160.

Sennov S.N. The Results of an Experimental Study of Competition in Stands. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 1993, no. 11, p. 160. (In Russ.).

20. Сеннов С.Н. Итоги экспериментального изучения взаимоотношений деревьев в смешанных насаждениях // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2003. № 170. С. 21–31.

Sennov S.N. The Results of an Experimental Study of Tree Relationships in Mixed Plantations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2003, no. 170, pp. 21–31. (In Russ.).

21. Сеннов С.Н., Мельников Е.С. Особенности межвидовых взаимоотношений между деревьями // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1996. № 4. С. 39.

Sennov S.N., Melnikov E.S. Peculiarities of Interspecific Relationships Between Trees. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 1996, no. 4, p. 39. (In Russ.).

22. Терсков И.А., Терскова М.И. О закономерностях процесса изреживания светолимитированных древостоев // Математический анализ компонентов лесных биогеоценозов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 25–44.

Terskov I.A., Terskova M.I. On the Regularities of the Thinning Process of Light-Limited Stands. *Mathematical Analysis of the Components of Forest Biogeocenoses*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, pp. 25–44. (In Russ.).

23. Трушевский П.В., Куницкая О.А. Влияние технологии и системы машин лесосечных работ на концентрацию порубочных остатков // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 110–113.

Trushevskij P.V., Kunitskaya O.A. The Influence of Technology and the System of Forestry Machines on the Concentration of Logging Residues. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevoopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 110–113. (In Russ.).

24. Трушевский П.В., Куницкая О.А. Современные системы машин для очистки лесосек от порубочных остатков // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.М. Казакова и др. Казань: Казанск. нац. исслед. технол. ун-т, 2023. С. 121–126.

Trushevskij P.V., Kunitskaya O.A. Modern Systems of Machines for Clearing Cutting Areas from Logging Residues. *Aktual'nye problemy lesnogo khozyajstva i derevoopererabotki: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. by Yu.M. Kazakov et al. Kazan, Kazan National Research Technological University, 2023, pp. 121–126. (In Russ.).

25. Berglin E., Brodal G.S. A Simple Greedy Algorithm for Dynamic Graph Orientation. *Algorithmica*, 2020, vol. 82, pp. 245–259. <https://doi.org/10.1007/s00453-018-0528-0>

26. Hertz E., Kunickaya O., Runova E., Tikhonov E., Timokhov R., Mikhaylenko E., Chemshikova Ju., Perfiliev P. Forest Preservation Techniques in the Urals. *International Journal of Environmental Studies*, 2023, vol. 80, iss. 4, pp. 1055–1064.

<https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2096959>

27. Karp R.M. Reducibility Among Combinatorial Problems. *50 Years of Integer Programming 1958–2008*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, pp. 219–241.

[https://doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0_8)

28. Morkovina S.S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V.L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative Analysis of Economic Aspects of Growing Seedlings with Closed and Open Root Systems: The Experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, iss. 2, pp. 19–26.

<https://doi.org/10.3233/AJW210015>

29. Rego G.E., Grigoreva O.I., Voronov R.V. Algorithms for Calculating Schemes of Transport Routes in a Felling Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. no. 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012025>

30. Ryabukhin P., Kunickaya O., Burgonutdinov A., Makuev V., Sivtseva T., Zdrauskaite N., Hertz E., Markov O. Improving the Efficiency of Forest Companies by Optimizing the Key Indicators of Sustainable Forest Management: a Case Study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 190–200.

<https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

31. Ryan C.T., Smith R.L. A Greedy Algorithm for Finding Maximum Spanning Trees in Infinite Graphs. *Operations Research Letters*, 2022, vol. 50, iss. 6, pp. 655–659.

<https://doi.org/10.1016/j.orl.2022.10.004>

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

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

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630:528.88(470.57)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-51-62

## Оценка трансформации лесов Южного Урала по разновременным космическим снимкам

*Р.Р. Султанова, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [G-1513-2018](https://orcid.org/0000-0002-0415-7342).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-7342>*

*Р.Р. Байтурина<sup>✉</sup>, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: [G-4845-2018](https://orcid.org/0000-0002-8156-2165).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-2165>*

*С.В. Диарова, ассистент; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5403-1683>*

Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34, г. Уфа, Россия, 450001; [vestnik-bsau@mail.ru](mailto:vestnik-bsau@mail.ru), [aspirant\\_bsau@mail.ru](mailto:aspirant_bsau@mail.ru)<sup>✉</sup>, [999di@mail.ru](mailto:999di@mail.ru)

---

*Поступила в редакцию 05.04.23 / Одобрена после рецензирования 26.06.23 / Принята к печати 28.06.23*

---

**Аннотация.** Исследована трансформация лесов Южного Урала за 25-летний период с применением геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования. Определен нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), который отражает влияние таких факторов, как содержание хлорофилла, площадь поверхности листьев, плотность и структура растительности. Индекс вычислен на основе дешифрования разновременных космических снимков (1995, 2013 и 2020 гг.) со спутников Pleiades-1A, Landsat-5 и -8 с использованием программного пакета ArcGIS для создания карты растительности, отражающей значения NDVI, и ретроспективного анализа ее состояния. Найденные значения имеют тесную корреляционную связь с показателями жизненного состояния, полученными натурным методом (коэффициент корреляции – 0,69). Расчет индекса NDVI, генерирование карт диапазона фиксированных значений NDVI и комбинация каналов «искусственные цвета» по годам позволили выделить лесные участки с оптимальными полнотой, возрастным и санитарным состоянием (темный окрас) и участки, нуждающиеся в лесовосстановлении. Сравнение распределения территории по классам NDVI за 1995–2020 гг. говорит о существенном изменении площади отдельных классов, которые сгруппированы в 11 классов и представлены значениями от –0,14 до +0,91. К 2020 г. превосходящая часть исследуемого участка стала относиться к более высоким классам NDVI – 9 и 10 и составила 98 %, что свидетельствует о возрастной однородности насаждений и повышении продуктивности лесов с 1995 г. Насаждения, имеющие большие индексы NDVI, характеризуются увеличенным по сравнению с другими древостоями накоплением древесной биомассы. Территории классов 1–9 (NDVI 0–0,8) демонстрируют значительное сокращение площади и схожую динамику, а территории классов 10–11 (NDVI 0,8–1,0) – ощутимую положительную динамику. Результаты исследования подтверждают правильность выбора индекса NDVI из известных индексов растительности для оценки трансформации типов подстилающей поверхности изучаемого участка за 25 лет. Таким образом, этот индекс является объективным индикатором состояния лесных экосистем. Методы дешифрирования пространственных изображений могут быть использованы для определения площади лесопокрытых земель и значительно повысить эффективность управления лесными ресурсами.

**Ключевые слова:** состояние леса, изменение состояния леса, дистанционное зондирование, географическая информационная система, вегетационный индекс, тип подстиляющей поверхности, картирование, Южный Урал

**Для цитирования:** Султанова Р.Р., Байтурина Р.Р., Диарова С.В. Оценка трансформации лесов Южного Урала по разновременным космическим снимкам // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 51–62. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-51-62>

Original article

## Assessment of the Transformation of Forests in the Southern Urals Based on Multi-Temporal Satellite Images

**Rida R. Sultanova**, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-1513-2018](https://orcid.org/0000-0002-0415-7342),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-7342>

**Regina R. Baiturina**✉, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4845-2018](https://orcid.org/0000-0002-8156-2165),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-2165>

**Svetlana V. Diarova**, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5403-1683>

Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, 450001, Russian Federation; [vestnik-bsau@mail.ru](mailto:vestnik-bsau@mail.ru), [aspirant\\_bsau@mail.ru](mailto:aspirant_bsau@mail.ru)✉, [999di@mail.ru](mailto:999di@mail.ru)

Received on April 5, 2023 / Approved after reviewing on June 26, 2023 / Accepted on June 28, 2023

**Abstract.** The transformation of forests in the Southern Urals over a 25-year period has been studied using geoinformation systems and remote sensing methods. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been determined, which reflects the influence of such factors as chlorophyll content, leaf surface area, vegetation density and structure. The index has been calculated based on the interpretation of multi-temporal satellite images (1995, 2013 and 2020) from the Pleiades-1A, Landsat-5 and -8 satellites using the ArcGIS software package to create a vegetation map reflecting NDVI values and a retrospective analysis of the condition of forest vegetation. The values found have a close correlation with the vitality indicators obtained by the field method (the correlation coefficient is 0.69). The calculation of the NDVI index, the generation of maps of the range of fixed NDVI values and the combination of “artificial colours” channels by year has made it possible to identify forest areas with optimal density, age and sanitary condition (dark colour) and areas in need of reforestation. A comparison of the distribution of territory by NDVI classes for 1995–2020 indicates a significant change in the area of individual classes, which are grouped into 11 classes and are represented by values from –0.14 to +0.91. By 2020, the superior part of the study area has begun to belong to higher NDVI classes – 9 and 10, and has amounted to 98 %, which indicates the age uniformity of plantations and an increase in forest productivity since 1995. Plantations with higher NDVI indices are characterized by an increased accumulation of woody biomass compared to other forest stands. The territories of classes 1–9 (NDVI 0–0.8) demonstrate a significant reduction in area and similar dynamics, while the territories of grades 10–11 (NDVI 0.8–1.0) demonstrate noticeable positive dynamics. The results of the study confirm the correctness of choosing the NDVI index from the known vegetation indices for assessing the transformation of the underlying surface types of the study area over 25 years. Thus, this index is an objective indicator of the assessment of the condition of forest ecosystems. Spatial image interpretation methods can be used to determine the area of forested lands and significantly improve the efficiency of forest resource management.

**Keywords:** forest condition, forest condition change, remote sensing, geographic information system, vegetation index, underlying surface type, mapping, the Southern Urals

**For citation:** Sultanova R.R., Baiturina R.R., Diarova S.V. Assessment of the Transformation of Forests in the Southern Urals Based on Multi-Temporal Satellite Images. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 51–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-51-62>

### Введение

По мнению М. Ciesielski et al. [7], леса важны не только как источник древесного сырья, они выполняют многочисленные экологические функции, воздействуют на качество жизни человека, в т. ч. через накопление углерода в наземной древесной биомассе, выброс которого в атмосферу ведет к негативным последствиям изменения климата. В связи с чем совершенствование инструментов мониторинга лесов, применение передовых технологий решают одновременно задачи как лесохозяйственного управления, так и повышения устойчивости этих природных систем. Таким образом, эффективность лесной политики и устранение последствий нерегулируемого использования лесов во многом обеспечиваются объективной методологией мониторинга экосистем.

Для получения наиболее точных показателей состояния лесов на больших площадях требуются трудоемкие наземные лесотаксационные исследования. Учитывая скорость изменения лесных экосистем и время, необходимое для их наземного мониторинга, целесообразно использовать дистанционное зондирование (ДЗ), которое, по мнению J. Féret et al. [8], V. Pechanec et al. [18], имеет важные преимущества – скорость, многократная повторяемость, ширина охвата, неразрушение леса. Т. Loboda et al. [15], Э.А. Курбанов и др. [1], А.С. Черепанов и Е.Г. Дружинина Е.Г. [3] отмечают, что применение ДЗ в исследовании лесов становится все значимее при наличии большого объема данных и необходимости их пространственного отображения для решения различных теоретических и практических проблем, в т. ч. при мониторинге растительного покрова, оценке влияния климата на леса и процессов деградации и опустынивания территорий, пожарной опасности лесных земель; многофакторная, комплексная оценка ранжированных во времени и пространстве показателей трансформирования экологии природных ландшафтов реализуется с использованием достижений общей картографии, геоинформационных технологий, дистанционного зондирования, математико-тематического моделирования.

Основные технические свойства космических спутников, работающих с использованием волн электромагнитного излучения различной длины, дают снимки для ДЗ Земли, проведения непрерывного мониторинга природных систем и получения актуальных показателей их состояния с высокой пространственной и временной детализацией [2]. Возможности геоинформационных систем (ГИС) в лесоводстве подробно отражены в работах российских и зарубежных ученых. Во многих странах мира широко используются разновременные снимки со спутников для отслеживания изменений в окружающей среде, вызванных изменением климата и деятельностью человека. Этот метод нашел применение, в частности, в исследованиях J. Herpininstall-Cymerman et al. [10] и Н.-Н. Nguyen et al. [17]. Анализ данных спутниковой съемки позволил Н.Л. Wiggins et al. [24] выявлять изменения больших площадей, осуществить их оценку и валидацию. Определить в перспективе возникновение многих экологических рисков возможно на основе составления карт с вегетационными индексами. N. Yasmin и соавт. [26] доказал, что индексы вегетации способны отражать ухудшение состояния лесной растительности, вызванное разнообраз-

ными факторами [22], в числе которых рекреация, разрастание городской инфраструктуры, эрозия почв, энтомо- и фитовредители и т. д. P.T. Wolter et al. [25] дали определение вегетационному индексу NDVI, назвав его «зеленым» индексом для оценки фотосинтетически активной массы лесной растительности. При этом авторы подчеркнули важность этого индекса как переменной, обеспечивающей относительную простоту расчета регрессии частичных наименьших квадратов (PLSR – Partial Least Squares Regression), когда за основу берется числовая оценка типа подстилающей поверхности. А.А. Wani et al. [23] отмечают, что применение индекса NDVI имеет потенциал для понимания изменчивости леса посредством установления взаимосвязей между его биофизическими параметрами [19], включая высоту, густоту кроны, сомкнутость деревьев и санитарное состояние. Доступность данных спутников Landsat с достаточным спектральным разрешением делают их привлекательными для картирования характеристик лесов в местном, региональном или даже глобальном масштабах. Поэтому представляется логичным, что использование спектральных данных позволит оптимизировать мониторинг состояния лесов по сравнению с объемными наземными исследованиями.

Цель работы – оценка изменения состояния лесов Южного Урала на основе применения методов геоинформационных систем и дистанционного зондирования.

Задачи:

- 1) дешифрирование разновременных снимков с космических спутников Pleiades и Landsat разного поколения;
- 2) картирование растительного покрова лесных насаждений с использованием индекса NDVI;
- 3) выявление трансформации состояния лесного объекта за 25-летний период.

#### *Объекты и методы исследования*

В работе применялись лесоводственно-таксационные методы и ГИС-технологии. Пробные площади заложены в соответствии с ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки». Объект исследования – чистые и смешанные по составу насаждения из лиственных (*Tilia cordata* Mill., *Betula pendula* Roth., *Acer platanoides* L., *Populus tremula* L., *Ulmus glabra* Huds., *Salix caprea* L., *Quercus robur* L., *P. balsamifera* L.) и хвойных пород (*Picea abies* L., *Pinus sylvestris* L.), отнесенных к Лесостепной лесорастительной зоне Лесостепному району Европейской части Российской Федерации. Протяженность территории с севера на юг – 98 км, с востока на запад – 95 км (рис. 1).

Местность равнинная, преобладает рельеф с пологими склонами крутизной до 10°. Магнитное склонение – 12,7°. Высота над уровнем моря – от 109 до 230 м. Тип почв – серые лесные. Кустарнички, ягодники, лишайники, мхи отсутствуют, что является характерным для Лесостепной лесорастительной зоны. Тип леса – снытьевый и злаково-осоковый (табл. 1).

Мониторинг состояния насаждений и выявление ретроспективных изменений выполнены с использованием технологий ГИС и методов ДЗ для получения разновременных спутниковых снимков Pleiades-1A (2013), Landsat-5 (1995) и Landsat-8 (2020). Площадь одного пикселя, м<sup>2</sup>: Landsat-5 (1995 г.) – 900; Pleiades-1A (2013 г.) – 0,25; Landsat-8 (2020 г.) – 100.

Нами использован космический снимок высокого разрешения со спутника Pleiades-1A: ID снимка – DS\_PHR1A\_201306250736306\_SE1\_PX\_

E057N54\_0220\_02977, дата съемки – 25.06.2013 г., угол отклонения от надира – 22,1°, облачность по сцене – 4 %, площадь покрытия – 25 км<sup>2</sup>, разрешение – 0,5 м (рис. 2).

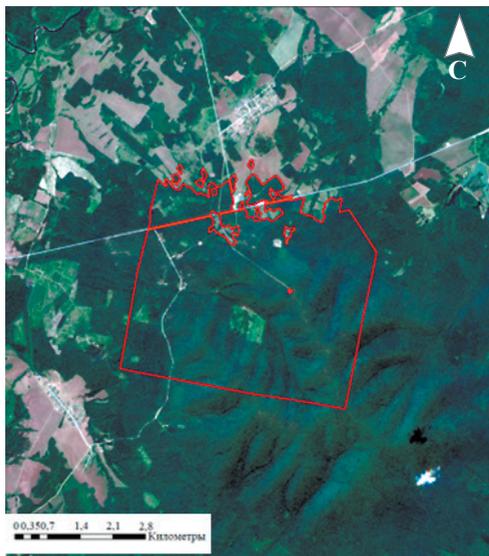


Рис. 1. Космический снимок Улу-Телякского участкового лесничества Иглинского лесничества Республики Башкортостан

Fig. 1. The satellite image of the Ulu-Telyak District Forestry of the Iglinsky Forestry of the Republic of Bashkortostan



Рис. 2. Космический снимок исследованного насаждения со спутника Pleiades-1A, 2013 г.

Fig. 2. The satellite image of the studied plantation from the Pleiades-1A satellite, 2013

Таблица 1

**Лесоводственно-таксационные показатели для площади 81 га квартала 311 Улу-Телякского участкового лесничества Иглинского лесничества, 2020 г.**  
**The silvicultural and inventory indicators for an area of 81 ha of quarter 311 of the Ulu-Telyak District Forestry of the Iglinsky Forestry, 2020**

Выдел	Площадь, га	Состав	Возраст, лет	Бонитет	Тип леса	Полнота	Запас на 1 га, м <sup>3</sup>	Общий запас, м <sup>3</sup>
1	1,6	10Лп <sub>н</sub> +В+Д <sub>н</sub>	85	3	СН	0,6	260	420
2	1,8	6Лп <sub>н</sub> 3В1Д <sub>н</sub> +Ив	90	3	СН	0,5	180	320
3	4,4	6Лп <sub>н</sub> 2Д <sub>н</sub> 2Б	75	3	СН	0,5	190	840
4	2,3	8Ив2Б	20	4	КТ	0,9	70	160
5	2,1	6Лп <sub>н</sub> 1Б1В2Д <sub>н</sub>	70	3	СН	0,5	180	380
6	1,2	6Лп <sub>н</sub> 1Б1В2Д <sub>н</sub>	70	3	СН	0,5	180	220
7	0,7	Линия электропередач	–	–	–	–	–	–
8	5,5	7Лп <sub>н</sub> 2Б1Д <sub>н</sub>	80	3	СН	0,5	220	1210
9	2,3	4Кл2В2Лп2Ив	20	3	СН	0,8	60	140
10	0,7	Линия электропередач	–	–	–	–	–	–
11	2,0	5Лп <sub>н</sub> 3Д <sub>н</sub> 1ОС1Б	85	3	ЗЛОС	0,5	220	440

Окончание табл. 1

Выдел	Площадь, га	Состав	Возраст, лет	Бонитет	Тип леса	Полнота	Запас на 1 га, м <sup>3</sup>	Общий запас, м <sup>3</sup>
12	1,5	9Б1Ив	65	2	СН	0,7	190	290
13	1,4	6Ос2В2Лп	5	2	СН	0,6	10	10
14	0,8	9Б1Ив	65	2	СН	0,7	190	150
15	8,8	7Б2Ос1Д <sub>н</sub> +Лп+В	65	2	СН	0,6	160	1410
16	0,4	Прогалина	–	–	–	–	–	–
17	2,5	5Лп <sub>н</sub> 3Б1В1Д <sub>н</sub>	70	3	СН	0,4	150	380
18	0,2	Сенокос	–	–	–	–	–	–
19	0,5	Линия электропередач	–	–	–	–	–	–
20	2,0	8Б2В	65	2	СН	0,6	140	280
21	2,2	6Лп <sub>н</sub> 2Кл1Д <sub>н</sub> 1В	80	3	СН	0,6	210	460
22	0,2	Линия электропередач	–	–	–	–	–	–
23	2,3	7Лп <sub>н</sub> 3Д <sub>н</sub> +В+Б	80	3	СН	0,4	150	350
24	3,4	10Ос	20	3	СН	0,9	80	270
25	0,9	Линия связи	–	–	–	–	–	–
26	2,3	7Ос2Кл1Б	18	3	СН	0,9	50	120
27	1,8	7Лп <sub>н</sub> 2Д <sub>н</sub> 1Б	90	3	СН	0,6	230	410
28	3,7	6Лп <sub>н</sub> 4Д <sub>н</sub>	80	3	СН	0,3	110	410
29	0,9	Линия связи	–	–	–	–	–	–
30	5,0	7Лп <sub>н</sub> 3Д <sub>н</sub>	80	3	СН	0,4	150	750
31	0,9	5Б3Е2Т	25	2	СН	0,5	40	40
32	2,5	7Ос3Б	25	2	СН	0,7	90	230
33	3,0	6Б4Ос	25	2	ЗЛОС	0,7	80	240
34	4,0	Л/к 5С3Ос2Б	23	2	ЗЛОС	0,5	70	280
35	2,1	Л/к 7Е2Т1Б	17	1	ЗЛОС	0,9	70	150
36	1,8	Л/к 5Е3Б1Д1В	26	3	ЗЛОС	0,4	40	70
37	1,0	6Б4Е	17	3	ЗЛОС	0,4	20	20
38	0,2	Автомобильная грунтовая	–	–	–	–	–	–
39	0,1	Просека квартальная	–	–	–	–	–	–

Примечание: СН – снытьевый; КТ – крапивно-таволговый; ЗЛОС – злаково-осоковый.

Применены также спутниковые данные 1995 и 2020 г. в качестве исходных материалов с более низким разрешением, которые в свободном доступе представлены Геологической службой США. Изображения обрабатывались с помощью программного продукта ArcGis 10.5. Попиксельно рассчитаны площади для каждого класса NDVI, с использованием калькулятора раstra проведено картирование изображений индекса NDVI и получены карты типов раститель-

ного покрова (табл. 2). Для распределения каждого класса NDVI по площади объекта исследования использован инструмент «Переклассификация».

Таблица 2

**Типы растительного покрова объекта исследования по величине NDVI  
и оценка состояния растительности\***  
**The vegetation cover types of the study object by NDVI value  
and vegetation condition assessment**

Тип подстилающей поверхности	Отражение в спектральной области		Значение NDVI
	красной	инфракрасной	
Растительность (древостой, подрост, подлесок) в состоянии: очень хорошем	0,10	0,50	0,71–1,00
хорошем	0,10	0,50	0,66–0,70
удовлетворительном	0,10	0,50	0,61–0,65
очень плохом, угнетенном	0,10	0,50	0,51–0,60
Разреженная растительность	0,10	0,30	0,31–0,50
Непокрытая лесом территория	0,25	0,30	0–0,30
Облачность	0,25	0,25	0
Снежный покров или наледь	0,38	0,35	–0,05
Водная поверхность	0,02	0,01	–0,25
Покрытие (асфальт/другое)	0,30	0,10	–0,50

\*С использованием данных сайта <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.

NDVI проще рассчитать, т. к. он находится в широком изменяющемся промежутке значений, имеет самую высокую чувствительность к типу почвенного покрова и менее восприимчив к почвенному и атмосферному фонемам, исключением является бедная (разреженная) растительность. NDVI рассчитывается как  $(NIR - RED) / (NIR + RED)$ , где NIR, RED – отражение в ближней инфракрасной (0,71–1,00 мкм) и красной (0,60–0,70 мкм) областях спектра соответственно. Согласно этой формуле, плотность растительности (NDVI) в конкретной точке изображения равна разнице интенсивности отраженного света в красном и инфракрасном диапазонах, деленной на сумму этих интенсивностей. Вычисление NDVI основано на 2 наиболее стабильных (независимых от других факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. Фотосинтетически активная деятельность сопровождается низким отражением в красном спектре и высоким – в инфракрасном. Определение различий между самыми низкими и наиболее высокими показателями отражательной способности увеличивает точность замеров, уменьшая воздействие отдельных факторов, например, связанных с неодинаковой освещенностью изображения, туманностью, облачностью, атмосферным поглощением излучения и др. При характеристике растительности индекс NDVI обычно имеет значения от 0,2 до 0,8, тогда как в целом находится в числовом интервале от –1 до 1.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Сравнение 3 космических снимков разных временных периодов за 1995, 2013, 2020 гг., покрывающих исследуемую территорию, позволило провести анализ современного состояния растительности и выявить ретроспективную

динамику NDVI. Распределение площади объекта по классам NDVI за 1995–2020 гг. говорит о существенном изменении размеров территорий отдельных классов, которые сгруппированы в 11 классов и представлены значениями от  $-0,14$  до  $+0,91$  (табл. 3). К 2020 г. большая часть изучаемого участка стала относиться к более высоким классам NDVI – 9 и 10 – и составила 98 %, что свидетельствует о возрастной однородности насаждений и повышении продуктивности лесов с 1995 г. Насаждения, имеющие более высокие NDVI, характеризуются накоплением превосходящего объема древесной биомассы. Территории классов 1–9 (NDVI 0–0,8) демонстрируют значительное сокращение площади и схожую динамику, а территории классов 10–11 (NDVI 0,81–1,0) – ощутимые положительные сдвиги.

Таблица 3

**Динамика площади типов лесного покрова для изучаемой территории за 25 лет на основе дешифрования космоснимков**  
**The dynamics of the area of forest cover types for the study area over 25 years based on the interpretation of satellite images**

NDVI		Площадь по годам, га			Изменения за годы					
класс	диапазон	1995	2013	2020	1995–2013		2013–2020		1995–2020	
					га	%	га	%	га	%
1	$-0,14$	0,09	0,01	0,01	$-0,08$	$-99,97$	0	100	$-0,08$	$-88,89$
2	$0-0,10$	0,63	0,02	0,02	$-0,61$	$-96,39$	0	0	$-0,61$	$-96,83$
3	$0,11-0,20$	2,52	0,11	0,22	$-2,41$	$-95,59$	0,11	97,75	$-2,30$	$-91,27$
4	$0,21-0,30$	6,66	1,11	0,48	$-5,55$	$-83,30$	$-0,63$	$-56,84$	$-6,18$	$-92,79$
5	$0,31-0,40$	8,73	2,38	0,70	$-6,35$	$-72,76$	$-1,68$	$-70,56$	$-8,03$	$-91,98$
6	$0,41-0,50$	17,01	4,14	2,43	$-12,87$	$-75,65$	$-1,71$	$-41,34$	$-14,58$	$-85,71$
7	$0,51-0,60$	57,51	7,18	6,00	$-50,33$	$-87,52$	$-1,18$	$-16,42$	$-51,51$	$-89,57$
8	$0,61-0,70$	964,20	14,79	9,93	$-949,47$	$-98,47$	$-4,86$	$-32,87$	$-954,33$	$-98,97$
9	$0,71-0,80$	925,02	125,62	111,05	$-799,40$	$-86,42$	$-14,57$	$-11,60$	$-813,97$	$-87,99$
10	$0,81-0,90$	0	1813,96	1851,92	1813,96	100	37,96	2,09	1851,92	100
11	$0,91$	0	13,38	0	13,38	100	$-13,38$	$-100$	0	100
<i>Итого</i>		1982,43	1982,70	1982,76						

Существенное изменение площади всех классов NDVI и переход лесных территорий с 8-го на более высокие классы (9 и 10) свидетельствует об увеличении фотосинтетической активности лесных насаждений объекта, что обусловлено ростом кроны деревьев, накоплением древесной биомассы с возрастом и является положительным фактором для данных лесов, находящихся в зоне пчеловодческих пасек и относящихся к нектарным липнякам (липа мелколистная нектарная). Общеизвестно, что нектаропродуктивность липняков напрямую связана с фотосинтетической активностью деревьев. Однако доминирование насаждений 9-го и 10-го классов NDVI, к которым в большей степени относятся древостои спелых и перестойных групп возраста, говорит о необходимости проведения заготовительных рубок и последующих лесовосстановительных мероприятий на значительной площади.

Проведено картирование типов покрова лесного участка (рис. 3, а). Снимки также были обработаны с использованием комбинации каналов «искусственные цвета» (рис. 3, б). Расчет NDVI на основе снимков как низкого, так и

высокого разрешения позволяет эффективно проводить комплексный анализ лесных территорий. Помимо выделяющихся непокрытых лесом и нелесных земель, четко определяются участки высокопродуктивных липовых древостоев, резко отличающиеся на индексированном изображении более темным окрасом. По светлому окрасу участков (желтый цвет) можно проследить мозаику зарастающих вырубок, гарей и др. По сравнению со снимком 2013 г. к 2020 г. появились участки с разреженной древесной растительностью (снижение полноты) и участки с открытым типом подстилающей поверхности (линии электропередач, линии связи), что подтверждается сопоставлением данных картирования с лесоводственно-таксационными показателями исследованных выделов.

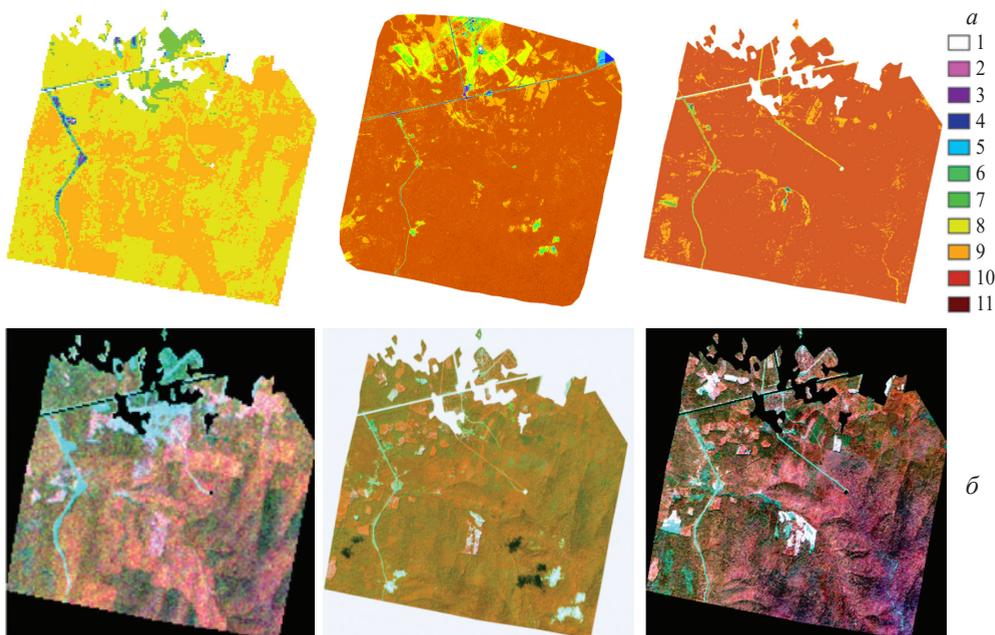


Рис. 3. Динамика индекса NDVI на лесных землях (а) и комбинация каналов «искусственные цвета» (б) по годам (слева – снимки 1995 г., полученные со спутника Landsat-5; в центре – 2013 г., Pleiades-1A; справа – 2020 г., Landsat-8)

Fig. 3. The dynamics of the NDVI index on forest lands (a) and the combination of “artificial colours” channels (b) by year (on the left – images from 1995 taken from the Landsat-5 satellite; in the centre – 2013, Pleiades-1A; on the right – 2020, Landsat-8)

Аналогичные результаты других исследований подчеркивают потенциал зарегистрированных исторических данных спутниковых снимков Landsat, которые предоставляют экстраординарную возможность для наблюдения за трансформацией лесов [5], при этом, по сведениям Li et al. [13], на достоверность расчета индекса NDVI и его классификации используемые поколения спутников – Landsat-5 или -8 – не влияют.

Анализ космических снимков и обширного архива позволяет непрерывно отслеживать изменения в лесном покрове. Наша работа демонстрирует большой потенциал применения серий снимков Landsat разного времени для оценки состояния лесных массивов Южно-Уральского региона, в т. ч. с преобладанием нектарных липняков, являющихся основной медоносной базой пчеловодства. Методы ДЗ, ГИС-технологии в последние годы активно

внедряются в исследования различных по породному составу, возрасту, продуктивности, климатическим условиям экосистем, не исключением являются тропические биоценозы [4, 5, 21], восточно-европейские леса [6, 8, 9, 12]. Данные методы апробированы для идентификации лесных территорий [11], в т. ч. в Канаде [23], странах Востока [13, 14, 16] и т. д. С начала 90-х гг. прошлого столетия индекс NDVI широко применяется при мониторинге состояния растительности (включая лесную [20]), выявлении биологических, физических параметров фитоценозов [18] и оценке антропогенного воздействия на природные объекты [21].

М. Hill et al. [11] подчеркнули, что количество аналитических методов с использованием показателей интервальных значений NDVI очень велико, они могут быть полезны в большом спектре исследований, включая оценку вегетационных тенденций в развитии растений, например, при изучении их фенологии.

### Заключение

На основе дешифрования разновременных космических снимков (1995, 2013 и 2020 гг.) со спутников Pleiades-1A, Landsat-5 и -8, генерирования карт растительности с отражением интервальных значений NDVI выполнен мониторинг лесной растительности за 25 лет. Выделены лесные участки с оптимальной нектаропродуктивностью (темный окрас) и разреженные участки, нуждающиеся в лесовосстановлении. Результаты исследования подтверждают правильность выбора нормализованного относительного индекса растительности NDVI для оценки трансформации типов подстилающей поверхности объекта за 25 лет. Этот индекс является объективным индикатором процессов, происходящих в лесных экосистемах. Применение дешифрирования космических снимков при анализе лесных участков значительно улучшает эффективность управления лесными ресурсами. На основе спутниковых снимков Landsat, полученных в разные периоды времени, можно идентифицировать лесные площади и выявить основные тенденции изменения их состояния. Методика дистанционного зондирования земли позволяет осуществлять непрерывный мониторинг различных характеристик больших лесных экосистем, что способствует отслеживанию актуальных изменений на обширных территориях и принятию мер по улучшению их комплексной продуктивности и устойчивости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Курбанов Э.А., Лежнин С.А., Воробьев О.Н., Меньшиков С.А., Дергунов Д.М., Ван И., Тарасова Л.В., Смирнова Л.Н. Аналитический обзор публикаций в области применения ДЗЗ и ГИС для оценки динамики растительного покрова // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. Йошкар-Ола, 2020. С. 91–111.

Kurbanov E.A., Lezhnin S.A., Vorobev O.N., Menshikov S.A., Dergunov D.M., Wang Y., Tarasova L.V., Smirnova L.N. Applications of Remote Sensing and GIS for Estimation of Land Use / Cover Change: A Review. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyj monitoring* = Forest Ecosystems in the Conditions of Climate Change: Biological Productivity, Monitoring and Technologies for Adaptation. Yoshkar-Ola, 2020, pp. 91–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/7232.2020.6.58830>

2. Пиньковский М.Д., Ивонин В.М., Самсонов С.Д., Ширяева Н.В., Егошин А.В. Научное обоснование ГИС «Сочинский национальный парк»: моногр. Сочи: Типография ИП Кривлякин С.П., 2011. 233 с.

Pin'kovskij M.D., Ivonin V.M., Samsonov S.D., Shiryayeva N.V., Egoshin A.V. Scientific Substantiation of the «Sochi National Park» GIS: Monograph. Sochi, Sole Proprietor Krivlyakin S.P. Printing House, 2011. 233 p. (In Russ.).

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

Cherapanov A., Druzhinina E. Spectral Characteristics of Vegetation and Vegetation Indexes. *Geomatika* = Geomatics, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

4. Abbas S., Wong M.S., Wu J., Shahzad N., Irteza S.M. Approaches of Satellite Remote Sensing for the Assessment of Above-Ground Biomass across Tropical Forests: Pan-Tropical to National Scales. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 20, art. no. 3351.

<https://doi.org/10.3390/rs12203351>

5. Ahrends A., Bulling M.T., Platts P.J., Swetnam R., Ryan C., Doggart N., Hollingsworth P.M., Marchant R., Balmford A., Harris D.J., Gross-Camp N., Sumbi P., Munishi P., Madoffe S., Mhoro B., Leonard C., Bracebridge C., Doody K., Wilkins V., Owen N., Marshall A.R., Schaafsma M., Pfilegner K., Jones T. Robinson J., Topp-Jørgensen E., Brink H., Burgess N.D. Detecting and Predicting Forest Degradation: A Comparison of Ground Surveys and Remote Sensing in Tanzanian Forests. *Plants, People, Planet*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 268–281. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10189>

6. Arekhi M., Yilmaz O.Y., Yilmaz H., Akyüz Y.F. Can Tree Species Diversity Be Assessed with Landsat Data in a Temperate Forest? *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, vol. 189, art. no. 586. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6295-6>

7. Ciesielski M., Stereńczak K. Volunteered Geographic Information data as a source of information on the use of forests in the Warsaw agglomeration // *Sylwan*, 2020, vol. 164, pp. 695–704.

8. Féret J.-B., de Boissieu F. BiodivMapR: An R package for  $\alpha$ - and  $\beta$ -Diversity Mapping Using Remotely Sensed Images. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020, vol. 11, iss. 11, pp. 64–70. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13310>

9. Fischer R., Knapp N., Bohn F., Huth A. Remote Sensing Measurements of Forest Structure Types for Ecosystem Service Mapping. *Atlas of Ecosystem Services*. Springer, Cham, 2019, pp. 63–67. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0_11)

10. Hepinstall-Cymerman J., Coe S., Alberti M. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling. *Remote Sensing*, 2009, vol. 1, no. 4, pp. 1353–1379. <https://doi.org/10.3390/rs1041353>

11. Hill M.J., Donald G.E. Estimating Spatio-Temporal Patterns of Agricultural Productivity in Fragmented Landscapes using AVHRR NDVI Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 84, iss. 3, pp. 367–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00128-1)

12. Hycza T., Kamińska A., Stereńczak K. The Use of Remote Sensing Data to Estimate Land Area with Forest Vegetation Cover in the Context of Selected Forest Definitions. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 11, art. no. 1489. <https://doi.org/10.3390/f12111489>

13. Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest Aboveground Biomass Estimation Using Landsat 8 and Sentinel-1A Data with Machine Learning Algorithms. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. no. 9952. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67024-3>

14. Li Z., Chen H., White J.C., Wuder M.A., Hermosilla T. Discriminating Treed and Non-Treed Wetlands in Boreal Ecosystems Using Time Series Sentinel-1 Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, vol. 85, art. no. 102007. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102007>

15. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Hall J. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of

European Russia. *Land–Cover and Land–Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Springer, Cham., 2017, pp. 173–192.

[https://doi.org/10.1007/978-3-319-42638-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42638-9_8)

16. Mao F., Du H., Li X., Ge H., Cui L., Zhou G. Spatiotemporal Dynamics of Bamboo Forest Net Primary Productivity with Climate Variations in Southeast China. *Ecological Indicators*, 2020, vol. 116, art. no. 106505. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106505>

17. Nguyen H.-H., McAlpine C., Pullar D., Johansen K., Duke N.C. The Relationship of Spatial–Temporal Changes in Fringe Mangrove Extent and Adjacent Land-Use: Case Study of Kien Giang Coast, Vietnam. *Ocean & Coastal Management*, 2013, vol. 76, pp. 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.01.003>

18. Pechanec V., Štěrbová L., Purkyt J., Prokopová M., Včeláková R., Cudlin O., Vyvlečka P., Cienciala E., Cudlin P. Selected Aspects of Carbon Stock Assessment in Aboveground Biomass, 2022, vol. 11, no. 1, art. no. 66. <https://doi.org/10.3390/land11010066>

19. Sellers P.J., Tucker C.J., Collatz G.J., Los S.O., Justice C.O., Dazlich D.A., Randall D.A. A Global 1° by 1° NDVI Data Set for Climate Studies. Part 2: The Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, iss. 17, pp. 3519–3545.

<https://doi.org/10.1080/01431169408954343>

20. Townshend J.R.G., Justice C.O., Skole D., Malingreau J.-P., Cihlar J., Teillet P., Sadowski F., Ruttensberg S. The 1 km Resolution Global Data Set: Needs of the International Geosphere Biosphere Programme. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, iss. 17, pp. 3417–3441. <https://doi.org/10.1080/01431169408954338>

21. Valderrama-Landeros L., Flores-Verdugo F., Rodríguez-Sobreyra R., Kovacs J.M., Flores-de-Santiago F. Extrapolating Canopy Phenology Information Using Sentinel-2 Data and the Google Earth Engine Platform to Identify the Optimal Dates for Remotely Sensed Image Acquisition of Semiarid Mangroves. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 279, art. no. 111617. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111617>

22. Wang Q., Watanabe M., Hayashi S., Murakami S. Using NOAA AVHRR Data to Assess Flood Damage in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, vol. 82, pp. 119–148. <https://doi.org/10.1023/A:1021898531229>

23. Wani A.A., Bhat A.F., Gato A.A., Zahoor S., Mehraj B., Najam N., Wani Q.S., Islam M.A., Murtaza S., Dervash M.A., Joshi P.K. Assessing Relationship of Forest Biophysical Factors with NDVI for Carbon Management in Key Coniferous Strata of Temperate Himalayas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2021, vol. 26, art. no. 1. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09937-6>

24. Wiggins H.L., Nelson C.R., Larson A.J., Safford H.D. Using LiDAR to Develop High-Resolution Reference Models of Forest Structure and Spatial Pattern. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 434, pp. 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.012>

25. Wolter P.T., Townsend P.A., Sturtevant B.R. Estimation of Forest Structural Parameters Using 5 and 10 Meter SPOT-5 Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, iss. 9, pp. 2019–2036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.009>

26. Yasmin N., Khokhar M.F., Tanveer S., Saqib Z., Khan W.R. Dynamical Assessment of Vegetation Trends over Margalla Hills National Park by Using MODIS Vegetation Indices. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2016, vol. 53(4), pp. 777–786.

<https://doi.org/10.21162/PAKJAS/16.3759>

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

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

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630\*573.22

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-63-75

## Фитомасса фракций деревьев по модели рангового распределения

**Ю.Д. Иванова**<sup>1</sup>✉, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-8012-2019](https://orcid.org/0000-0003-3792-4584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3792-4584>

**А.В. Ковалев**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [K-1756-2018](https://orcid.org/0000-0002-9744-768X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-768X>

**В.Г. Суховольский**<sup>3</sup>, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [K-1740-2018](https://orcid.org/0000-0003-0407-2290),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-2290>

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН Красноярского научного центра СО РАН, Академгородок, д. 50/50, г. Красноярск, Россия, 660036; lulja@yandex.ru✉

<sup>2</sup>Красноярский научный центр СО РАН, Академгородок, д. 50, г. Красноярск, Россия, 660036; sunhi.prime@gmail.com

<sup>3</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН Красноярского научного центра СО РАН, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; soukhovolsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.03.23 / Одобрена после рецензирования 18.06.23 / Принята к печати 20.06.23

**Аннотация.** Одним из важнейших показателей состояния дерева является его фитомасса. Ее прямые измерения (с рубкой, сушкой и взвешиванием) очень трудозатратны и имеют различную степень надежности. Наименее достоверны данные по фитомассам корней (особенно для деревьев старших возрастов, где прямые раскопки корневой системы требуют значительных усилий). Это обуславливает необходимость разработки моделей расчета фитомасс фракций по достаточно просто и надежно измеряемым таксационным характеристикам. В статье для описания конструкции дерева предлагается использовать модель свободной конкуренции при распределении ресурсов, доступных дереву в процессе роста, между его фракциями (ствол, корни, ветви, листья или хвоя). Модель позволяет рассчитать соотношения между фитомассами фракций. На основе этих расчетов обосновывается метод оценки фитомасс корней. Проанализированы различия параметров моделей распределения фракций по фитомассе для разных древесных пород и различных зон произрастания. Для проверки корректности модели использованы данные из базы В.А. Усольцева (2016) по фитомассам фракций деревьев (6617 записей) в лесных насаждениях Евразии. Вычисленные ранговые распределения для 95 % деревьев различных пород разного возраста, произрастающих в неодинаковых географических условиях, имеют коэффициент детерминации больше 0,96, следовательно, данная модель носит общий характер и хорошо описывает соотношения между фитомассами фракций деревьев. Предлагаемый подход существенно упрощает полевые измерения, однако требует предварительной оценки параметров уравнения возрастной динамики для отдельной породы в конкретных климатических зонах. Проведенные по данным базы В.А. Усольцева расчеты коэффициента конкуренции для сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Сибири на территориях Томской и Новосибирской областей, Алтайского и Красноярского краев показывают близость параметров модели для деревьев одной породы, произрастающих в различных условиях. Использование разработанной модели позволяет оценить фитомассы дерева (включая фитомассу корней) по таким легко измеряемым показателям, как высота дерева и диаметр ствола. Предлагается подход для определения фитомассы корней, при котором вместо проведения их раскопок используются данные о фитомассах надземных фракций дерева.

**Ключевые слова:** лесные насаждения, оценка состояния лесного насаждения, фитомасса, фракции дерева, ранговое распределение

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания ЦЭПЛ РАН (№ 1022090800034-7-1.6.19) в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 сент. 2022 г. № 25-15р в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

**Для цитирования:** Иванова Ю.Д., Ковалев А.В., Суховольский В.Г. Фитомасса фракций деревьев по модели рангового распределения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 63–75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-63-75>

Original article

## Phytomass of Tree Fractions According to the Rank Distribution Model

**Yulia D. Ivanova**<sup>1</sup>✉, Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAD-8012-2019](https://orcid.org/0000-0003-3792-4584), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3792-4584>

**Anton V. Kovalev**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [K-1756-2018](https://orcid.org/0000-0002-9744-768X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-768X>

**Vladislav G. Soukhovolsky**<sup>3</sup>, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [K-1740-2018](https://orcid.org/0000-0003-0407-2290),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-2290>

<sup>1</sup>Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [lulja@yandex.ru](mailto:lulja@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [sunhi.prime@gmail.com](mailto:sunhi.prime@gmail.com)

<sup>3</sup>Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [soukhovolsky@yandex.ru](mailto:soukhovolsky@yandex.ru)

---

Received on March 28, 2023 / Approved after reviewing on June 18, 2023 / Accepted on June 20, 2023

---

**Abstract.** One of the most important indicators of the condition of a tree is its phytomass. Its direct measurements (with cutting, drying and weighing) are very labour-intensive and have varying degrees of reliability. The data on root phytomass are the least reliable (especially for older trees, where direct excavation of the root system requires considerable effort). This necessitates the development of models for calculating the phytomass of fractions based on fairly simple reliably measured inventory characteristics. The article suggests using a free competition model to describe the structure of a tree when distributing resources available to the tree during growth between its fractions (stem, roots, branches, leaves or needles). The model allows calculating the ratios between the phytomasses of fractions. Based on these calculations, a method for estimating root phytomass has been substantiated. The differences in the parameters of the models for the distribution of fractions by phytomass for different tree species and different growth zones have been analyzed. To verify the correctness of the proposed model, data from the database by V.A. Usol'tsev (2016) on the phytomass of tree fractions (6,617 records) in Eurasian forest plantations have been used. The calculated rank distributions for 95 % of trees of various species of different ages growing in different geographical conditions have a coefficient of determination greater than 0.96, therefore, this

model is of a general nature and describes well the relationships between the phytomass fractions of trees. The proposed approach significantly simplifies field measurements, but requires a preliminary assessment of the parameters of the equation of age dynamics for a particular species in specific climatic zones. Calculations of the competition coefficient for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Siberia in the territories of the Tomsk and Novosibirsk Regions, the Altai and Krasnoyarsk Territories based on the data from the database by V.A. Usoltsev show the proximity of the model parameters for trees of the same species growing in different conditions. The use of the developed model makes it possible to estimate the tree phytomass (including root phytomass) using such easily measurable indicators as tree height and stem diameter. An approach has been proposed for determining the phytomass of roots, in which, instead of excavating them, data on the phytomasses of the above-ground fractions of the tree are used.

**Keywords:** forest plantations, assessment of the condition of forest plantations, phytomass, tree fractions, rank distribution

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state task of the Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (no. 1022090800034-7-1.6.19) in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated September 2, 2022 no. 25-15r in order to implement the most important innovative project of national importance aimed at creating a unified national system for monitoring climatically active substances.

**For citation:** Ivanova Yu.D., Kovalev A.V., Soukhovolsky V.G. Phytomass of Tree Fractions According to the Rank Distribution Model. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 63–75 (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-63-75>

### Введение

Фитомасса является одним из основных показателей состояния древесных растений и сформированных ими насаждений. При этом для понимания процессов роста деревьев и депонирования ими углерода важно иметь информацию о фитомассе фракций деревьев (стволов, корней, ветвей и листьев или хвои) и изменении их соотношения с возрастом дерева или насаждения [1, 2, 4, 5, 9, 14, 18–21, 25, 27, 28]. Для оценки фитомассы производятся ее прямые измерения – рубка деревьев, сушка и взвешивание фитомасс фракций. Однако степень надежности таких измерений для фракций дерева различается. Наименее достоверны данные по фитомассам корней (особенно для деревьев старших групп возраста, здесь прямые раскопки корневой системы требуют значительных усилий). Трудоемкость обозначенных оценок стимулирует разработку способов расчета фитомасс фракций по достаточно просто и точно фиксируемым таксационным характеристикам – высоте дерева и диаметру ствола. Действительно, фитомасса корней, отражающая устойчивость дерева к ветровому воздействию, должна быть связана с его высотой и диаметром. Также фитомасса ствола, оцениваемая по высоте и диаметру, должна коррелировать и с фитомассой листьев (хвои), характеризующей фотосинтетическую активность древесных растений и накопление фитомассы.

Однако простых соотношений между фитомассами деревьев, подобных аллометрическим уравнениям  $H = aD^\beta$ , связывающим диаметры стволов  $D$  и высоты  $H$  деревьев [10] ( $a, \beta$  – коэффициенты уравнения), до настоящего времени не найдено. Поэтому для оценки связей между фитомассой фракций

обычно используются регрессионные уравнения, так называемые конверсионные коэффициенты [6, 23, 24]. Но если существуют теоретические модели, объясняющие, почему зависимость между диаметром ствола дерева и его высотой должна быть аллометрической [10], то теоретических обоснований для расчета конверсионных коэффициентов не предложено.

Целью исследования является разработка методов расчета соотношений между фитомассами фракций дерева с использованием модели рангового распределения Ципфа–Парето [7, 12, 15–17, 29]. На базе этого подхода предлагается метод оценки фитомасс фракций (в частности, фитомассы корней деревьев) по данным о фитомассе ствола (т. е. фактически по высоте и диаметру дерева). Кроме того, описанные соотношения позволяют проверить надежность баз данных.

### *Объекты и методы исследования*

Для анализа использована база данных [22]. В эту базу включены данные измерений, проведенных различными авторами (более 100) на территории Евразии, где произрастают насаждения порядка 63 различных видов деревьев. Каждая запись в базе включает данные

по породе дерева, местоположению и географическим координатам; возрасту, высоте, диаметру и объему ствола; густоте насаждений;

общей фитомассе и фракционному составу фитомассы дерева: фитомассам ствола (с корой и без коры), ветвей, листьев (хвои), корней; происхождению дерева (естественное или искусственное).

Всего в базе 6617 записей, для 1527 из них приведены данные по всем фракциям деревьев, а для остальных – только по надземным.

Таким образом, представленные сведения можно рассматривать как базу данных, включающую характеристики деревьев разных пород, возрастов и местообитаний. Такая база данных позволяет попытаться найти общие закономерности процессов распределения фитомассы деревьев по фракциям в ходе роста.

У дерева существуют 4 основные функциональные структуры (фракции), обеспечивающие его существование как целого. Это корни, ствол, ветви и листья (хвоя). Исчезновение или уменьшение массы хотя бы одной из фракций может привести к ухудшению состояния дерева и даже к его гибели. Губительна и чрезмерная гипертрофия любой из фракций – высокое дерево с разросшейся кроной при малых диаметре ствола и фитомассе корней неизбежно станет легкой «добычей» ветра. Слишком большие корни, защищая, с одной стороны, дерево от ветровых воздействий, с другой – отбирают ресурс, необходимый на синтез листьев, и сами страдают от недостатка поступающих из кроны продуктов фотосинтеза для поддержания жизнедеятельности корня. Таким образом, дерево способно выжить только в случае, когда его фракции не получают одностороннего развития в ущерб другим, и поэтому дереву нужны фракции всех типов и в определенной пропорции.

Для описания оптимальной конструкции дерева рассмотрим модель свободной конкуренции при распределении ресурсов, доступных дереву в процессе роста. Воспользуемся уравнением Ципфа–Парето [12, 29]:

$$M(i) = M(1)/i^b, \quad (1)$$

где  $i$  – ранг компоненты (т. е. ее номер в ряду, начинающемся с максимального значения фитомассы фракции  $M(1)$ , которому присваивается ранг 1);  $M(1)$  – фитомасса 1-й по рангу группы (обычно ствол);  $b$  – коэффициент конкуренции фракций за фитомассу, находится как тангенс угла наклона прямой.

Случай, когда  $b \rightarrow \infty$ , означает, что практически вся фитомасса относится к 1-й по рангу фракции;  $b \rightarrow 0$  соответствует ситуации примерно равного распределения всей фитомассы между фракциями. Из (1) можно получить уравнение для всей фитомассы дерева в возрасте  $A$ :

$$M(A) = \sum_{i=1}^4 M(i, A) = M(1, A) \sum_{i=1}^4 i^{-b(A)}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что не может быть однозначной связи между высотой  $H$  и диаметром  $D$  дерева, определяющими фитомассу  $M(1, A)$  ствола, и суммарной фитомассой дерева  $M(A)$ , т. к. функции  $M(A)$  при одном и том же значении  $H$  и  $D$  могут быть различными. Однако, зная функцию  $b(A)$  и фитомассу ствола дерева в возрасте  $A$ , можно вычислить фитомассы фракций и общую фитомассу дерева. Для оценки фитомассы ствола необходимо располагать информацией о высоте, диаметре дерева, форме ствола (характеризуемой видовым числом) и удельной массе древесины. Таким образом, используя (1) и (2), можно подойти к расчету фитомасс фракций дерева, нужны только его высота и диаметр ствола.

Насколько точна модель (1) и производная от нее модель (2)? Если точность высокая, соотношения фитомасс деревьев в базе данных должны соответствовать модели (1). В случае многочисленных отклонений от (1) модель некорректна.

В настоящей работе для базы данных [22] проведен анализ информации по фитомассам фракций с точки зрения их согласия с ранговым распределением (1) и описаны примеры расчетов фитомасс фракций дерева по его высоте и диаметру ствола.

Для определения существования связей между фитомассами фракций, характеризуемых моделью свободной конкуренции, для каждой записи выбирались данные по надземным фракциям, эти данные ранжировались и вычислялись коэффициенты уравнения (1). Коэффициенты рассматривались для группы записей в базе, для которых были сведения о фитомассах всех фракций. Для всех записей в базе изымались фитомассы корней и рассчитывались параметры ранговых регрессионных уравнений в двойных логарифмических координатах с предположением, что ранги корней могут быть равны 2 или 3:

$$\ln M(i) = \ln M(1) - b \ln i. \quad (3)$$

Для иллюстрации на рис. 1 представлена в двойных логарифмических координатах зависимость (3) для сосны обыкновенной.

При регрессионном анализе данных в двойных логарифмических координатах происходит их смещение, связанное с минимизацией суммы невязок не между значениями фитомасс из базы и значениями из регрессионных уравнений, а между логарифмами этих величин. Расчеты в данном случае возможно корректировать [26]. Однако при оценке ошибок ранее было найдено, что расхождение при расчете без принятия во внимание минимизации невязки логарифмов для диапазона данных по фитомассам фракций соответствует расхо-

ждению в параметрах регрессии по сотым долям значений [7], такие различия можно не учитывать.

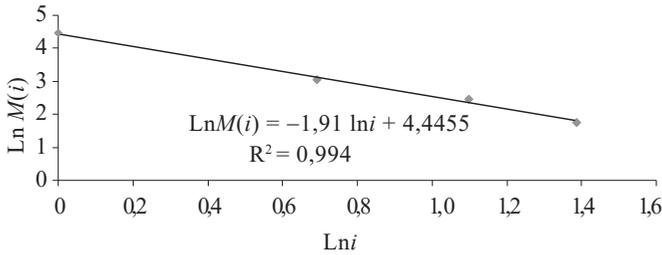


Рис. 1. Типичный вид рангового распределения фитомасс фракций дерева *Pinus sylvestris* L., 55 лет, Южная Карелия (62°13' с. ш. 34°10' в. д.) [22]

Fig. 1. A typical view of the rank distribution of phytomass fractions of a *Pinus sylvestris* L. tree, 55 years old, South Karelia (62°13' N, 34°10' E) [22]

Соответствие данных модели рангового распределения характеризовалось по коэффициенту детерминации  $R^2$ . Для 4 степеней свободы коэффициент значим на уровне  $p = 0,95$  при  $R^2 > 0,9025$  [8].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для всех 6617 записей в базе В.А. Усольцева были вычислены коэффициенты детерминации  $R^2$  (рис. 2) и коэффициенты  $a$  и  $b$  ранговых уравнений для надземных фракций дерева.

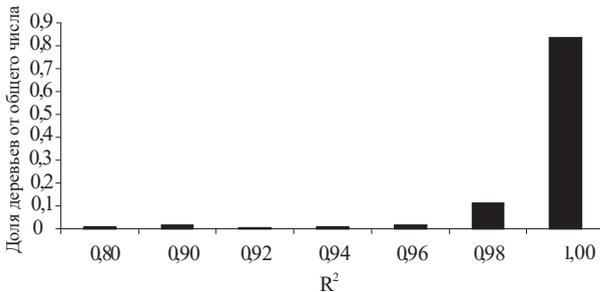


Рис. 2. Коэффициенты детерминации ранговых распределений фракций деревьев без данных о фитомассе корней [22]

Fig. 2. The coefficients of determination of rank distributions of tree fractions without data on root phytomass [22]

Как видно из рис. 2, для 95 % деревьев различных пород и возраста, произрастающих в неодинаковых географических условиях, коэффициент детерминации превосходит 0,96, т. е. вычисленные ранговые распределения хорошо согласуются с моделью (3) и эта модель пригодна для описания соотношений между фитомассами фракций деревьев любых пород в разных возрастах и произрастающих в различных условиях. Можно сказать, что модель (3) носит общий характер.

Примерно для 5 % данных в базе коэффициенты детерминации меньше 0,96. Скорее всего, это связано либо с ошибками измерений, либо с отклонениями процессов роста деревьев от предлагаемой модели. Если причиной малых значений  $R^2$  являются несоответствия постулируемым в модели процессам роста, то последнее должно быть связано с особенностями деревьев (породой, возрастом и местообитанием). Анализ деревьев с отклоняющимися от модели характеристиками показал, что из 315 деревьев (4,8 % от общего числа) у 81 % возраст не превышал 50 лет. Таким образом, в период начального роста дерева

вероятны некоторые отклонения от модели и при дальнейших расчетах эти деревья не следовало бы использовать.

В табл. 1 представлены доли деревьев разных пород, для которых коэффициенты детерминации были статистически значимы для уровня  $p = 0,95$ . Доля деревьев с незначимыми коэффициентами характеризует расхождение данных в базе с моделью свободной конкуренции.

Таблица 1

**Расхождение данных в базе с моделью для деревьев различных пород**  
**The discrepancy between data in the database and the model for trees**  
**of different species**

Порода	Число записей в базе	$R^2 > 0,96$	$R^2 < 0,96$
<i>Larix</i>	247	0,976	0,024
<i>Abies sibirica</i> L.	81	0,889	0,111
<i>Betula</i>	1144	0,969	0,031
<i>Pinus sylvestris</i> L.	2507	0,973	0,027
<i>Picea obobata</i> L.	337	0,730	0,270

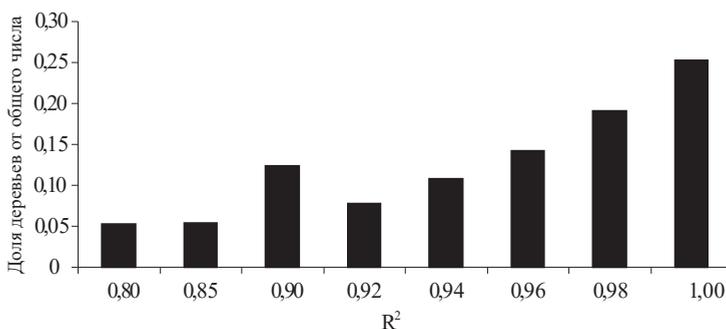


Рис. 3. Коэффициенты детерминации для ранговых распределений фракций деревьев с данными по фитомассе корней [22]

Fig. 3. The coefficients of determination for rank distributions of tree fractions with root phytomass data [22]

Из рис. 3 следует, что доля деревьев с  $R^2 \geq 0,95$  в данном случае составляет 70 %, что существенно меньше доли деревьев с аналогичным коэффициентом для группы деревьев, для которых при расчете рангового распределения использовались только надземные фракции. Такое различие можно объяснить тем, что ошибка в определении фитомассы корней может быть существенно больше ошибок в определении фитомасс надземных фракций. В связи с этим в качестве примера рассмотрим данные по распределению 4 фракций фитомассы отдельной сосны в лесах Архангельской области [11]. Если вести расчет по показателям всех фракций дерева, то  $R^2 = 0,94$ . При этом фитомасса корней, равная 64 кг, имеет ранг 3. Однако если рассматривать только надземные фракции, то  $R^2 = 0,996$  (рис. 4), а расчетная фитомасса корней – 157 кг, что в большей степени согласуется с необходимостью поддержать устойчивость дерева с массой ствола почти 800 кг и его диаметром на высоте груди 48 см.

Для деревьев с обозначенной в базе данных фитомассой корней гистограмма распределения по коэффициенту детерминации в соответствии с рангами несколько отличается от гистограммы для деревьев без таких данных (рис. 4).

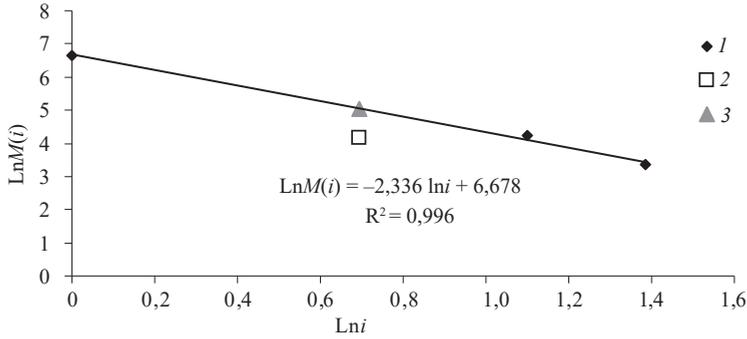


Рис. 4. Ранговое распределение фитомассы сосны по фракциям:  
 1 – фитомасса надземных фракций [11]; 2 – фитомасса корней [11];  
 3 – фитомасса корней по модельным данным

Fig. 4. The rank distribution of pine phytomass by fractions: 1 – phytomass of above-ground fractions [11]; 2 – root phytomass; 3 – root phytomass based on model data

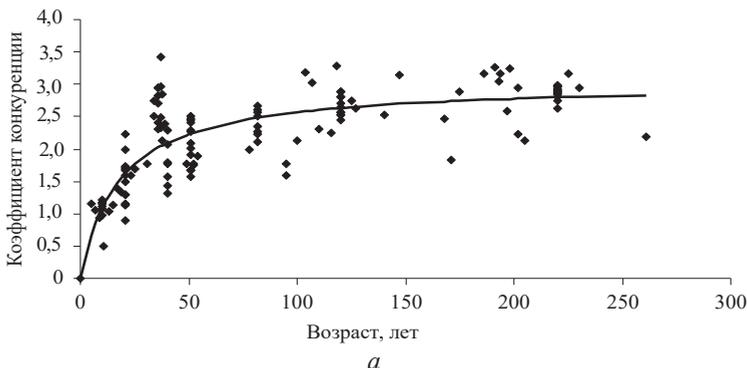
Зная по данным о фитомассах надземных фракций параметры уравнений рангового распределения для деревьев без сведений о фитомассе корней, можно оценить эти фитомассы, предположив, что их ранг равен 2. Тогда фитомасса корней вычисляется из выражения  $\ln M(2) = a - b \ln 2$ .

Как следует из (1) и (3), для оценки фитомасс фракций по данным о размерах ствола необходимо знать коэффициент конкуренции. Всего в базе данных было выбрано 128 деревьев *Larix cajanderi* Mayr., *L. decidua* Mill., *L. gmelinii* (Rupr.) Rupr., *L. leptolepis* Gord., *L. olgensis* A. Henry., *L. sukaczewii* N. Dyl. Для этих видов в возрасте от 5 до 260 лет  $b$  с возрастом увеличивается. Эта связь хорошо описывается уравнением Михаэлис–Ментен:

$$b = \frac{b_{\max} A}{Q + A}, \quad (4)$$

где  $b_{\max}$  и  $Q$  – коэффициенты.

Для лиственниц вычисления дают следующие значения параметров:  $b_{\max} = 3,02$ ;  $Q = 17,84$ . При расчетах использована опция «поиск решения» Excel. Аналогично были выполнены расчеты для сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. на Среднем Урале:  $b_{\max} = 3,71$ ;  $Q = 14,48$ . Данные в базе позволяют сравнить и зависимость между  $b$  и  $A$  для сосны обыкновенной в Сибири на территориях Томской и Новосибирской областей, Алтайского и Красноярского краев (всего 247 деревьев). В этом случае  $b_{\max} = 3,39$ ;  $Q = 14,14$  (рис. 5).



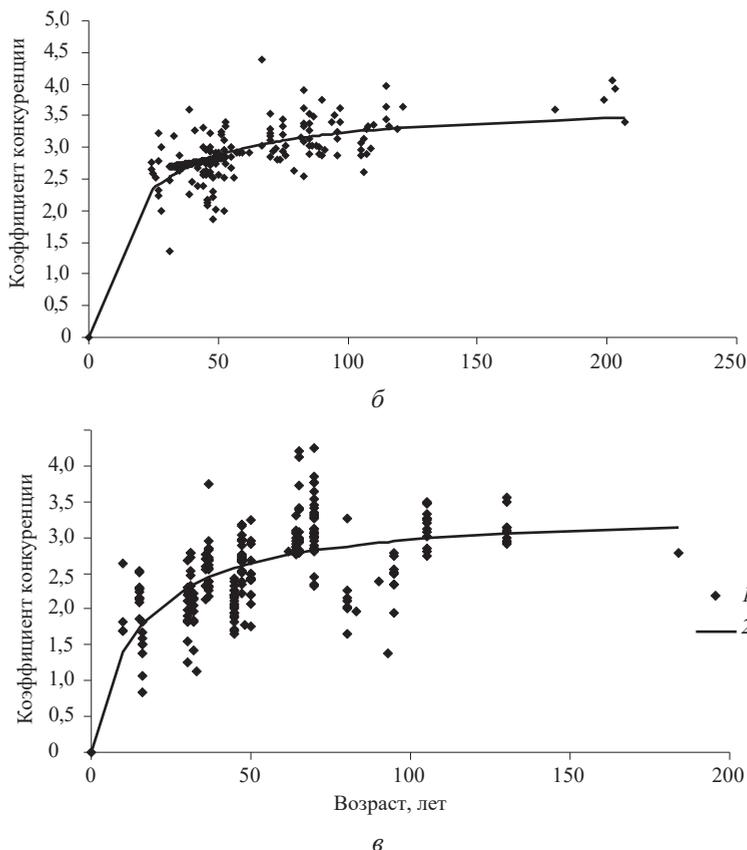


Рис. 5. Связь возраста и коэффициента конкуренции рангового распределения фитомассы: *a* – для лиственниц разных видов; *б* – для сосны обыкновенной на Среднем Урале; *в* – для сосны обыкновенной в Сибири (1 – расчет по (3) на основе данных из базы [22]; 2 – расчеты по (4))

Fig. 5. The relationship between age and competition coefficient of the rank distribution of phytomass: *a* – for larches of different species; *б* – for Scots Pine in the Middle Urals; *в* – for Scots pine in Siberia (1 – calculation by (3) based on data from the database [22]; 2 – calculations by (4))

К сожалению, вычислить для некоторых территорий параметры уравнения для коэффициента конкуренции по сведениям базы затруднительно в связи с нехваткой локальной информации по деревьям разных возрастов и пород, однако коэффициенты уравнения (4) для отдельных пород, представленных в анализируемой базе данных, оценить реально (табл. 2).

Таблица 2

**Параметры уравнения (4) для изменений коэффициента конкуренции с возрастом дерева для отдельных пород**  
**The parameters of equation (4) for changes in the competition coefficient with tree age for individual species**

Порода	Число записей в базе	$b_{\max}$	Q, возраст, лет	Невязка в расчете на одно дерево
<i>Betula alba</i> L.	1084	2,59	7,64	0,131
<i>Quercus robur</i> L.	98	2,63	7,75	0,129

Окончание табл. 2

Порода	Число записей в базе	$b_{\max}$	Q, возраст, лет	Невязка в расчете на одно дерево
<i>Populus tremula</i> L.	424	3,07	11,67	0,137
<i>Larix sibirica</i> L.	108	2,89	13,29	0,172
<i>L. sukaczewii</i> N. Dyl.	58	2,89	27,53	0,105
<i>Pinus sylvestris</i> L.	1945	2,65	13,06	0,162
<i>P. sibirica</i> Du Tour.	160	2,41	39,28	0,255
<i>Picea obovata</i> L.	336	1,58	41,99	0,087

Как видно из табл. 2, точность аппроксимации, оцененная по средней невязке между натурными и модельными данными, для деревьев всех пород близка. Для большинства пород (за исключением *P. obovata*) параметр  $b_{\max}$  близок. Параметр Q, характеризующий возраст насаждения, в котором коэффициент конкуренции  $b = b_{\max}/2$  минимален для деревьев лиственных пород, а для хвойных пород может достигать 40 лет.

Если уравнения, связывающие  $b$  и  $A$ , видоспецифичны и не зависят от размеров дерева и территории произрастания, то для расчета фитомасс фракций дерева по данным о его высоте и диаметру можно предложить следующую процедуру:

1. Измеряется высота и диаметр дерева и рассчитывается фитомасса ствола  $M(1)$  по выражению  $M(1) = m_{\text{уд}} f \frac{\pi D^2}{4} H$  (где  $f$  – видовое число) [13].

Для оценки плотности фитомассы  $m_{\text{уд}}$  можно использовать существующие таблицы или произвести с помощью весов прямые измерения массы керна фиксированной длины (в этом случае получим плотность древесины в сыром виде). Для оценки видового числа также можно использовать таблицы [3].

2. Определяется возраст дерева, и по уравнению (4) для данной породы вычисляется  $b$ .

3. По уравнению (3) находятся фитомассы фракций, при этом делается предположение, что ранг фитомассы корней равен 2, ранг фитомассы ветвей – 3 и ранг фитомассы хвои – 4.

#### Заключение

Приведенные расчеты подтверждают корректность предложенного подхода к описанию соотношений фитомасс фракций дерева. Подход позволяет оценить фитомассу (включая фитомассу корней) по таким легко измеряемым таксационным показателям, как высота дерева и диаметр его ствола на высоте 1,3 м. Использование модели распределения ресурса дает возможность определить фитомассу корней, не проводя их раскопок и используя данные о фитомассах надземных фракций дерева.

Описанный метод существенно упрощает измерения, однако требует предварительного установления коэффициента конкуренции – параметра уравнения возрастной динамики – для отдельной породы в конкретных климатических зонах. Расчеты коэффициента конкуренции показывают близость параметров уравнения для деревьев одной породы, произрастающих в различных условиях. Предлагаемый подход также может быть применен для проверки надежности данных по фитомассам фракций деревьев в базах данных. При значи-

тельных отклонениях от распределения Ципфа–Парето полученные показатели необходимо использовать с предельной осторожностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев В.А., Бердси Р.А. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ИЛИД, 1994. 224 с.  
Alekseev V.A., Birdsey R.A. *Carbon Stock in Forest Ecosystems and Peatlands of Russia*. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood Publ., 1994. 224 p. (In Russ.).
2. Арутюнян С.Г., Уткин А.И. Вертикально-фракционное распределение фитомассы в лесах. М.: Наука, 1986. 264 с.  
Arutyunyan S.G., Utkin A.I. *Vertical-Fractional Distribution of Phytomass in Forests*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 264 p. (In Russ.).
3. Багинский В.Ф. Таксация леса. Гомель: ГГУ им Ф. Скорины, 2013. 416 с.  
Baginskij V.F. *Forest Inventory*. Gomel, Gomel State University named after F. Skorina Publ., 2013. 416 p. (In Russ.).
4. Бузыкин А.И., Пиеничникова Л.С., Суховольский В.Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 2002. 152 с.  
Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Soukhovolsky V.G. *Density and Productivity of Tree Cenoses*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002. 152 p. (In Russ.).
5. Данилин И.М., Цогт З. Морфометрические параметры и фитомасса деревьев лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb. в Восточном Хэнтэе (Северная Монголия) // Сиб. лесн. журн. 2015. № 5. С. 96–104.  
Danilin I.M., Tsogt Z. Morphometric Parameters and Phytomass of the Siberian Larch *Larix sibirica* Ledeb. Trees in the Eastern Khentey (Northern Mongolia). *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 5, pp. 96–104. (In Russ.).
6. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений // Лесоведение. 2000. № 6. С. 54–63.  
Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. System of Conversion Ratios for Calculating Net Primary Production of Forest Ecosystems by Stand Stocks. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2000, no. 6, pp. 54–63. (In Russ.).
7. Исаев А.С., Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г. Распределение фитомассы деревьев и насаждений по фракциям: модель конкуренции. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 2007. Т. 21. С. 232–250.  
Isaev A.S., Ovchinnikova T.M., Soukhovolsky V.G. *Distribution of Phytomass of Trees and Plantations by Fractions: a Competition Model. Problems of Environmental Monitoring and Ecosystem Modeling*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2007, vol. 21, pp. 232–250. (In Russ.).
8. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.  
Kobzar' A.I. *Applied Mathematical Statistics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 816 p. (In Russ.).
9. Комаров А.С., Гинжул Л.К., Шанин В.Н., Быковец С.С., Бобкова К.С., Кузнецов М.А., Манов А.В., Осипов А.Ф. Особенности распределения биомассы бореальных видов деревьев по фракциям // Изв. РАН. Сер.: Биологическая. 2017. № 6. С. 656–664.  
Komarov A.S., Ginzbul L.K., Shanin V.N., Bykhovets S.S., Bobkova K.S., Kuznetsov M.A., Manov A.V., Osipov A.F. Pattern of Biomass Partitioning into Fractions of Boreal Trees. *Izvestiya RAN. Seriya: Biologicheskaya* = Biology Bulletin, 2017, no. 6, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1062359017060061>
10. Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 210 с.  
Kofman G.B. *Tree Growth and Shape*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 210 p. (In Russ.).

11. Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в сосняках беломошниках // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974. С. 24–42.

Molchanov A.A. Productivity of Organic Matter in White Moss Pine Forests. *Productivity of Organic and Biological Matter of Forests*. Moscow, Nauka Publ., 1974, pp. 24–42. (In Russ.).

12. Парето В. Компендиум по общей социологии. М.: ГУ ВШЭ, 2008. 511 с.

Pareto V. *Compendium of General Sociology*. Moscow, State University Higher School of Economics Publ., 2008. 511 p. (In Russ.).

13. Поздеев Д.А., Петров А.А. Таксация леса. Ижевск: ИжГСХА, 2012. 164 с.

Pozdeev D.A., Petrov A.A. Forest Inventory. Izhevsk, Izhevsk State Agricultural Academy, 2012. 164 p. (In Russ.).

14. Соколов В.А., Аткин А.С., Зиганшин Р.А. Структура и рост древостоев Сибири. Красноярск: РАН СО Ин-т леса им. В.Н. Сукачева, 1993. 176 с.

Sokolov V.A., Atkin A.S., Ziganshin R.A. *Structure and Growth of Forest Stands in Siberia*. Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), 1993. 176 p. (In Russ.).

15. Суховольский В.Г. Распределение фитомассы деревьев по фракциям и оценка биопродуктивности деревьев и насаждений // Лесоведение. 1996. № 1. С. 30–40.

Soukhovolsky V.G. Distribution of Tree Phytomass by Fractions and Assessment of Bioproductivity of Trees and Plantations. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1996, no. 1, pp. 30–40. (In Russ.).

16. Суховольский В.Г. Экономика живого. Новосибирск: Наука, 2004. 140 с.

Soukhovolsky V.G. *Economy of the Living*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 140 p. (In Russ.).

17. Суховольский В.Г., Иванова Ю.Д. Оценка чистой первичной продукции лесных насаждений с использованием модели распределения фитомассы по фракциям // Лесоведение. 2013. № 5. С. 20–28.

Soukhovolsky V.G., Ivanova Yu.D. Estimation of Net Primary Production of Forest Stands Using a Model of Phytomass Distribution by Fractions. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2013, no. 5, pp. 20–28. (In Russ.).

18. Тарасов С.И., Пристова Т.А., Бобкова Л.С. Динамика фитомассы древостоя лиственно-хвойного фитоценоза средней тайги // Сиб. лесн. журн. 2018. № 1. С. 50–58.

Tarasov S.I., Pristova T.A., Bobkova L.S. Dynamics of Phytomass of a Tree Stand of the Deciduous-Coniferous Phytocenosis in Middle Taiga of Komi Republic. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2018, no. 1, pp. 50–58. (In Russ.).

19. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с.

Usol'tsev V.A. *Forest Phytomass of Northern Eurasia: Standards and Geographic Elements*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. 762 p. (In Russ.).

20. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Usol'tsev V.A. *Biological Productivity of Forests in Northern Eurasia: Methods, Database and its Applications*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 636 p. (In Russ.).

21. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 573 с.

Usol'tsev V.A. *Forest Biomass and Primary Production Database for Eurasia*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 573 p. (In Russ.).

22. Усольцев В.А. Фитомасса модельных деревьев лесообразующих пород Евразии: база данных, климатически обусловленная география, таксационные нормативы. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. 338 с.

Usol'tsev V.A. *Single-Tree Biomass of Forest-Forming Species in Eurasia: Database, Climate-Related Geography, Mensuration Standards*. Yekaterinburg, Ural. State Forest Engineering University Publ., 2016. 338 p. (In Russ.).

23. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36–46.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I. Allometric Equations for Phytomass Based on Pine, Spruce, Birch and Aspen Trees in European Russia. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1996, no. 6, pp. 36–46. (In Russ.).

24. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Нefeld'ев В.В., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И., Гамбург С.П. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов // Лесоведение. 1997. № 5. С. 51–65.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Nefed'ev V.V., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I., Gamburg S.P. Determination of Carbon Stocks of Plantations in Sample Plots: Comparison of Allometric and Conversion-Volume Methods. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1997, no. 5, pp. 51–65. (In Russ.).

25. Швиденко А.З., Щепашченко Д.Г., Нильсон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Московск. типогр., № 6. 2008. 887 с.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'son S., Buluj Yu.I. Tables and Models of the Growth and Productivity of Plantations of the Main Forest-Forming Species of Northern Eurasia (Regulatory Reference Materials). Moscow, Moscow Print. House, 2008, no. 6. 887p. (In Russ.).

26. Baskerville G.L. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 1972, vol. 2, no. 1, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>

27. Chen W., Zhang Q., Cihlar J., Bausch J., Price D.T. Estimating Fine-Root Biomass and Production of Boreal and Cool Temperate Forests Using Aboveground Measurements: A New Approach. *Plant and Soil*, 2004, vol. 265, pp. 31–46. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8503-3>

28. Clark D.A., Brown S., Kicklighter D.W., Chambers J.Q., Thomlinson J.R., Ni J. Measuring Net Primary Production in Forests: Concepts and Field Methods. *Ecological Applications*, 2001, vol. 11(2), pp. 356–370.

29. Mandelbrot B. New Methods in Statistical Economics. *The Journal of Political Economy*, 1963, vol. LXXI, no. 5, pp. 421–440. <https://doi.org/10.1086/258792>

**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\*431.5(470.51)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-76-91

## Динамика изменения лесопожарной опасности в Удмуртской Республике

*А.П. Тюрин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-6236-2014](https://orcid.org/0000-0002-3898-0804),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3898-0804>*

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, Россия, 426069; asd1978@mail.ru

*Поступила в редакцию 11.09.23 / Одобрена после рецензирования 05.12.23 / Принята к печати 07.12.23*

**Аннотация.** Исследованы основные подходы к организации мониторинга пожароопасных ситуаций на региональном уровне и проблемы, возникающие при техническом обеспечении такого мониторинга. Целью работы является изучение динамики изменения пожарной опасности в лесах на территории Удмуртской Республики. Варьирование комплексного показателя пожарной опасности, наблюдаемого независимо от структуры таксационных выделов, рассматривается наряду с данными о фактических пожарах 2011–2023 гг. В связи со значительной протяженностью территории Удмуртии предполагается различие комплексного показателя с изменением долготы или широты, рассчитанного для максимального количества точек наблюдения одновременно. Разработано приложение, с помощью которого реализованы сбор, отображение данных и расчет комплексного показателя пожарной опасности по 210 населенным пунктам в течение 94 дней летнего периода 2023 г. Приложение позволяет оценить как статические данные по пожарам в прошлом в виде «пузырьковой» визуализации, так и колебания комплексного показателя в течение пожароопасного сезона. В качестве погодного сервиса использовался OpenWeather, библиотека картографических данных – OpenLayers. Отличительными особенностями созданного приложения стали: а) отображение направления ветра и класса пожарной опасности в точках наблюдения с помощью цветowych маркеров; б) использование растровой карты-подложки региона для определения потенциальной связи сложившегося класса пожарной опасности с характером участков лесного фонда. Как показало исследование, в пределах каждого из 25 муниципальных образований региона фактический комплексный показатель может значительно меняться. Результаты многодневного мониторинга позволили установить сильную корреляционную связь (0,88) между показателем и долготой для населенных пунктов Удмуртской Республики, слабую (0,31) – между показателем и широтой. Показано, что большая часть пожаров за апрель–октябрь приходится на май – 33,8 % от общего числа случаев в 2011–2023 гг. Результаты исследования могут быть полезны для разработки и проведения мероприятий по предупреждению лесных пожаров и снижению ущерба от них, а также для уточнения или валидации зон потенциальных возгораний на основе современных подходов.

**Ключевые слова:** лесной пожар, динамика изменения, комплексный показатель пожарной опасности, сезон, отслеживание погодных данных, направление ветра

**Для цитирования:** Тюрин А.П. Динамика изменения лесопожарной опасности в Удмуртской Республике // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 76–91. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-76-91>

© Тюрин А.П., 2025

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

Original article

## The Dynamics of Forest Fire Hazard Changes in the Udmurt Republic

*Alexander P. Tyurin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-6236-2014](https://orcid.org/0000-0002-3898-0804),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3898-0804>*

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University, ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russian Federation; [asd1978@mail.ru](mailto:asd1978@mail.ru)*

*Received on September 11, 2023 / Approved after reviewing on December 5, 2023 / Accepted on December 7, 2023*

**Abstract.** The main approaches to the organization of monitoring of fire hazardous situations at the regional level and the problems arising in the technical support of such monitoring have been investigated. The aim of this work has been to study the dynamics of changes in fire hazard in forests on the territory of the Udmurt Republic. The variation in the comprehensive fire hazard indicator, observed regardless of the structure of survey plots, has been considered along with data on actual fires in 2011–2023. Due to the significant extent of the territory of Udmurtia, it has been assumed that the comprehensive indicator differs with a change in longitude or latitude, calculated for the maximum number of observation points simultaneously. An application has been developed that collects and displays data and calculates a comprehensive fire hazard indicator for 210 localities over 94 days of the summer period of 2023. The application allows one to evaluate both static data on fires in the past in the form of a “bubble” visualization, and fluctuations in the comprehensive indicator during the fire season. OpenWeather has been used as a weather service, and OpenLayers – as a map data library. The distinctive features of the created application have been: a) displaying the wind direction and fire hazard class at observation points using color markers; b) using a raster map of the region to determine the potential connection between the current fire hazard class and the nature of the forest fund plots. As the study has shown, within each of the 25 municipalities of the region, the actual comprehensive indicator can vary significantly. The results of multi-day monitoring have made it possible to establish a strong correlation (0.88) between the indicator and longitude for populated areas of the Udmurt Republic, and a weak correlation (0.31) between the indicator and latitude. It has been shown that the majority of fires in April–October occur in May – 33.8 % of the total number of cases that have occurred during the period of 2011–2023. The results of the study can be useful for the development and implementation of measures to prevent forest fires and reduce damage from them, as well as for clarifying or validating potential fire zones based on modern approaches.

**Keywords:** forest fire, dynamics of change, comprehensive fire hazard indicator, season, weather data tracking, wind direction

**For citation:** Tyurin A.P. The Dynamics of Forest Fire Hazard Changes in the Udmurt Republic. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 76–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-76-91>

### Введение

Лесные пожары играют решающую роль в трансформации ландшафта, смене растительности, деградации почв и качестве воздуха. Повышение точности оценки пожарного риска важно для предупреждения и снижения

негативных последствий пожара на лесную экосистему, т. к. в перспективе позволит планировать управляющее воздействие на появление возгораний принятыми способами. Для регионального уровня разработка методических подходов, обеспечивающих обоснование управленческих решений по предупреждению лесных пожаров является актуальной задачей, варианты решения которой раскрываются в различных научных источниках. Основные направления предсказания лесопожарных чрезвычайных ситуаций представлены Ю.В. Подрезовым [6]. Так, при оперативном наблюдении за пожарной опасностью в лесах используют данные спутникового мониторинга, обрабатываемые в геоинформационных системах. Известны, например, оперативная карта пожаров НИИ аэрокосмического мониторинга ([http://aerocosmos.info/emergency\\_search/](http://aerocosmos.info/emergency_search/)), картографирование пройденных огнем площадей, поддерживаемое Институтом космических исследований Земли (<http://iki-z.ru/default.aspx?id=3>), платформа для оперативного спутникового мониторинга пожаров «Сканэкс» (<http://pro.fires.ru>) и др. Полученные через информационные сервисы своевременные данные о воздействии огня на природные экосистемы способствуют эффективной охране лесов от пожаров, оценке экологических последствий. Аэрокосмический мониторинг результативен для планирования практической деятельности пожарных, поскольку позволяет ориентироваться на фактические случаи мест локализации огня.

С другой стороны, в настоящее время в соответствии с приказом Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды» (зарег. в Минюсте РФ 17.08.2011 № 21649) пожарная опасность в лесах классифицируется в зависимости от условий погоды. Данный подход дает возможность планировать предупреждающие мероприятия. В субъектах Российской Федерации могут разрабатываться региональные классы пожарной опасности в лесах по условиям погоды, определяющие методику расчета комплексного показателя пожарной опасности (КП), границы классов пожарной опасности, методику учета осадков. Исследования, посвященные разработке шкалы региональных классов пожарной опасности, подробно рассмотрены А.В. Волокитиной с коллегами [4]. Каждый регион обладает индивидуальными особенностями с точки зрения типов лесов и лесных участков, распределения содержащихся в них лесных горючих материалов и влаги, динамики изменения условий, способствующих формированию лесных пожаров. Изучение таких индивидуальных особенностей для каждого региона является важным этапом прогнозирования лесных пожаров. Комбинированный анализ указанных подходов, реализованный в рамках одной системы, содержит большой потенциал для науки и практики.

Цель работы – оценка особенностей динамики изменения пожарной опасности в лесах Удмуртской Республики. Подобные исследования для данной территории до этого времени не проводились, хотя в научной периодике можно встретить отдельные исследования лесопожарных рисков в регионах на основе накопленных данных о возгораниях: Н.Н. Брушлинский с коллегами [2], С.Н. Волков с коллегами [3], К.Ж. Раимбеков [7], С.С. Тимофеева с коллегами [9].

За рубежом региональные исследования также нередки, по большей части они посвящены построению моделей оценки пожароопасных зон на тер-

риториях на основе ключевых показателей, прописанных в рамках соответствующих методик, например, Канадской методики, подробно разобранной B.D. Lawson et al. [16]. В отдельных источниках применяется картирование вероятности лесных пожаров в лесном массиве с использованием метода искусственной нейронной сети – для бассейна Верхнего Сейхана в Турции в работе S. Onur et al. [23], северо-востока Португалии в работе Y. Safi et al. [22]. Лесные пожары обуславливаются многими факторами – не только географическими и метеорологическими причинами. Большую роль в возникновении лесных пожаров играют и техногенные факторы, зависящие от социально-экономических условий. В исследовании V. Sevinç [24] ставится задача составления карты зон пожароопасности с помощью набора данных, включающего 11 антропогенных факторов, природный фактор и температуру. В рамках работы [24] региональные лесные управления Турции были разделены на 4 кластера с отображением их на карте: зона экстремального риска, высокого, умеренного и низкого. Такой подход позволяет сравнить разные районы по степени пожарного риска внутри отдельной территориальной единицы.

Оценка корреляции лесных пожаров с различными географическими и погодными факторами с дальнейшим применением результатов при картировании вероятности лесных пожаров приводится в работе [23]. На основе корреляции Пирсона установлено, что особенности ландшафта (высота над уровнем моря), древесный покров и температура сильно коррелируют с возможностью возгораний в лесу. В подобном исследовании Li Xiaowei et al. [17] приведены результаты прогнозирования пожарной опасности для 4 регионов Китая во взаимосвязи с географическими координатами, временем суток с учетом значительного диапазона. Показано, например, что пространственное положение оказывает существенное влияние во всех изученных регионах.

В исследовании D. Alves et al. [11] уточняются результаты предсказания пожарной опасности на границе Португалии и Испании на основе как КП, так и статистических данных о количестве пожаров и площади выгоревших территорий в 2005–2013 гг. Межрегиональные различия частично объясняются различиями в местных погодных и растительных условиях.

В исследовании M.M. Maombi et al. [18] совместное использование полевых и спутниковых данных о погоде позволило определить ежедневную опасность лесных пожаров в типичном лесу умеренного пояса на северо-востоке Китая осенью. Результаты работы привели к предположению о необходимости увеличения количества метеостанций в пожароопасных регионах. Установлено, что северо-восточная часть страны с лесным покровом 41,6 % имеет наибольшую территорию, пострадавшую от распространения огня.

Кроме установления территориальных особенностей в области лесопожарных чрезвычайных ситуаций, подходом для прогнозирования лесных пожаров является накопление статистической информации и совершенствование способов ее обработки с учетом многочисленных факторов, определяющих лесопожарную обстановку. Статистическая информация о лесных пожарах существует как для регионального уровня России, так и для зарубежных стран, например, в годовых отчетах Европейской информационной системы о лесных пожарах, один из которых опубликован J. San-Miguel-Ayanz et al. [15]. Эти отчеты содержат информацию об эволюции лесных пожаров, нанесенном ими ущербе, пожарной обстановке. В [15] показано, что большинство весенних по-

жаров возникло из-за антропогенного воздействия, а также в результате переноса пожаров с земель других категорий. В летний период, хотя и наблюдались максимальные температуры, причиной основной части пожаров стали человеческий фактор и грозовая активность. Осенью возгорания обусловлены только антропогенным фактором. Такая информация свидетельствует о том, что метеорологические показатели не всегда определяют возможность возникновения пожара, существуют и другие причины – особенности гидрологической сети, дорожных путей, источники возгораний, посещаемость человеком, фенологическое состояние растительности и др.

Статистическая информация по пожарам должна отражаться в рамках единой системы поддержки принятия решений. Такие системы могут помочь оптимизировать распределение ограниченных ресурсов, оценивать пожарный риск с учетом социально-экономических и погодных факторов в рамках комплексного мониторинга с помощью информационных систем, описанных E. Chuviesco et al. [13]. Ограничением существующих систем является недостаточно проработанная методика установки связей как с классом пожарной опасности по КП, так и со структурой таксационных выделов.

Существующие региональные исследования пожарной опасности разнообразны и направлены на выявление особенностей цикла развития лесных пожаров, характерного для конкретной местности.

В рамках данного исследования, впервые проведенного для Удмуртской Республики, предполагается установить:

- взаимосвязь между КП (метеорологическим показателем) и географическими координатами;
- особенности колебаний КП в пределах муниципального образования;
- характер распределения пожаров по территории за период (2011–2023 гг.), для которого есть доступная информация.

Полученные результаты могут лечь в основу более точного прогнозирования лесных пожаров, базирующегося на использовании современных подходов, и станут вкладом в оценку пожарной опасности по условиям погоды на региональном уровне, а также будут способствовать принятию решений для разработки эффективных защитных мероприятий, в т. ч. профилактического характера, уточнять особенности формирования лесопожарной обстановки на территории Удмуртской Республики на основе коммерческих картографических данных и сервисов погоды.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать инструментарий для мониторинга данных с использованием доступных погодных сервисов и картографических данных, собрать информацию за достаточно продолжительный период, выполнить анализ полученных данных в совокупности с зафиксированными случаями пожарной опасности. Кроме того, решается задача визуализации как КП с учетом его значения и направления ветра, так и количества возникших пожаров за 2011–2023 гг. на основе картографической библиотеки региона.

Базовым подходом для оценки пожарной опасности на территории России является расчет КП, который устанавливается для местности с неизменной совокупностью погодных данных для расчета показателя. В зависимости от его значения определяется класс пожарной опасности в лесах и регламентируется работа лесопожарных служб. Для вычисления КП необходимы следующие

данные: температура воздуха, точка росы ( $^{\circ}\text{C}$ ), скорость ветра (м/с) на 13 ч по местному времени или, в соответствии с приказом Рослесхоза от 05.07.2011 № 287, по состоянию на 12–14 ч, а также количество выпавших осадков за предыдущие сутки (мм).

Ограничение данного подхода заключается в том, что расчеты не учитывают пирологические особенности таксационных выделов и динамику их изменения на местности. При данном КП в лесу по условиям погоды и конкретной силе ветра прогноз лучше осуществлять исходя из характера участков лесного фонда.

Очевидно, что пожар может возникнуть и при низком КП. Кроме того, в рамках одного и того же муниципального округа КП, скорее всего, будет значительно отличаться в связи с колебаниями температур, изменением направления ветра. Насколько значительна окажется разница, например, в пределах муниципального образования, представляет интерес, т. к. динамика погоды совместно с другими факторами неодинаковы между населенными пунктами внутри муниципалитета. В итоге, для того чтобы составить общее представление по пожарной опасности местности, нужно иметь выборку как можно более многих точек наблюдения. В пределах таких точек используемые в расчетах метеорологические параметры примерно равные и определяются особенностями конкретного погодного сервиса.

Удмуртская Республика представляет собой достаточно обширный регион. Координаты:  $55^{\circ}12'–58^{\circ}38'$  с. ш.  $51^{\circ}10'–54^{\circ}26'$  в. д. Протяженность территории с севера на юг составляет 297,5 км; с запада на восток – 200 км. Общая длина границ равна 1800 км [10]. Республика не отличается большим количеством лесных пожаров, кроме того, данные КП за прошедший период при выполнении исследования недоступны. В связи с этим шкалу по методике Н.П. Курбатского (1963), упомянутой в [4], на основе соотношения между ежедневными показателем В.Г. Нестерова и количеством возникающих пожаров построить затруднительно. Однако разработка такой шкалы для региона на основании предложенных в данной статье методов и подходов возможна в перспективе. Распределение и анализ частоты пожаров за 2011–2023 гг. будут представлены в последующих разделах и позволят сформировать понимание о различии в пожарной опасности в целом на территории Удмуртии.

#### *Объекты и методы исследования*

Для выбора методов исследования выполнен аналитический обзор работ в изучаемой области и существующих подходов к оценке пожарной опасности в лесах России и зарубежья. Объектом данного исследования стала динамика изменения КП в разрезе регионов Удмуртской Республики, наблюдаемая в контексте цифровой географической карты региона в течение 94 суток. Для вычисления КП использовалась методика, учитывающая количество выпавших осадков в зависимости от его фактического значения [8].

Как правило, для долговременного наблюдения за пожарной опасностью и принятия своевременных управленческих решений внедряют информационные системы. Примерами таких систем, в основу которых положена та или иная теория прогнозирования или методы сбора данных, можно назвать работы А.П. Зверева с коллегой [5], E. Chuvieco et al. [13] и R. Mavsar et al. [19]. В дан-

ной статье был принят такой же вектор исследований. Для отображения карты и сбора данных предложено программное приложение.

Подзадачи исследования, связанные с реализацией методов, следующие: выбор доступных API (программные интерфейсы приложений) для отслеживания массива погодных данных на территории Удмуртской Республики; установление функциональности приложения по мониторингу КП, как в целом, так и его модулей;

подготовка реестра населенных пунктов, входящих в состав муниципальных образований региона, по критерию доступности данных в конкретном сервисе погоды;

собственно разработка приложения с выбором шаблона проектирования, его отладкой и тестированием с целью оценки качества сбора данных и вычисления КП;

анализ данных и подготовка заключения.

Мониторинг динамики КП осуществлялся на основе ежедневно собираемого массива данных погоды, источником которых могут быть различные погодные службы. Профессиональные API сервисов погоды, как правило, закрыты для свободного доступа, что накладывает ограничение на проектирование систем мониторинга пожарной опасности в зависимости от погодных условий для исследовательских целей. Однако существуют погодные сервисы, которые предоставляют данные, достаточные для расчета КП, любому пользователю. Поэтому методы работы основаны на применении открытого программного обеспечения, актуальность которого находится на высоком уровне, и в отдельных случаях возможно применение данного программного обеспечения при разработке систем поддержки принятия решений в области лесных пожаров, например, [21]. Для отображения степени пожароопасности регионов обычно применяется графическая кластеризация по данным географических информационных систем. В представляемом исследовании использовались открытые библиотеки – картографическая OpenLayers v6.0 и сервис погоды OpenWeather (<https://openweathermap.org/>). Оперирование информацией картографической библиотеки OpenLayers совместно с другими инструментами геоинформационных технологий широко распространено. Так, она используется при отображении актуальной информации об очагах и характеристиках территорий в одной из провинций Индонезии [12]. Также OpenLayers API применяется европейской информационной системой о лесных пожарах (EFFIS), являющейся модульной системой поддержки принятия решений посредством отслеживания лесных пожаров в континентальном масштабе. Система в режиме реального времени предоставляет многомерные данные о лесных пожарах службам гражданской защиты и пожаротушения в Европе, Северной Африке и на Ближнем Востоке [20].

Погодный сервис OpenWeather имеет возможности отображения массива погодных данных для выбранного пункта наблюдения. Кроме того, у сервиса существует функция предоставления индекса пожарной опасности Fire Weather Index API [14, 16]. Этот индекс разработан для оценки текущей и прогнозной пожарной опасности. Таким образом, OpenWeather является надежным источником информации. С использованием данных этого сервиса в данной статье возможности мониторинга пожарной опасности были расширены благодаря учету направлений ветра, что позволяет оценивать пожарную

обстановку с принятием во внимание того, на какой стороне находится наблюдаемый район – наветренной или подветренной. Как утверждает источник [15], зачастую пожары случаются в результате переноса действующих пожаров с соседних земель.

С помощью сервиса OpenWeather определена доступность погодных данных для 210 населенных пунктов, входящих в состав 25 муниципальных образований Удмуртской Республики – от 5 до 12 населенных пунктов на одно образование.

Функциональность приложения, достаточная для решения поставленных задач, заключалась в следующем:

- отображение границ региона в целом и муниципальных образований, в т. ч. для выбранной пользователем части региона;

- выведение географической карты региона с указанием видов растительности, древесных пород, заболоченности и пр.;

- вычисление КП с представлением в виде цветных маркеров в зависимости от его значения и направления ветра в наблюдаемом населенном пункте. Цвет маркеров устанавливался в соответствии с ГОСТ Р 22.1.09–99 «БЧС. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров» (рис. 1);

- сравнительное отображение в виде столбчатых диаграмм вычисленных значений КП для населенных пунктов, образующих выбранный пользователем муниципальный округ;

- предоставление краткой аналитической справки о лесопожарной опасности в регионе – максимальное/минимальное значения КП, количество случаев выпадения осадков, приведших к обнулению КП в населенных пунктах региона;

- выгрузка данных в формате .json для последующего анализа.

В качестве общего шаблона использован шаблон проектирования MVVM: модель (Model) – представление (View) – модель представления (ViewModel). Основная цель данного шаблона заключается в разделении приложения на 3 независимых блока с соответствующей функциональностью. Первый слой представляет собой логику обращения с данными, необходимыми для работы приложения, и базой данных (в нашем случае это память браузера IndexedDb). Второй блок – графический интерфейс (отображаемая карта, кнопки, столбчатые диаграммы и пр.), являясь «подписчиком» на событие изменения значений свойств, источник данных о которых – модель представления, он взаимодействует с последней путем запросов. Модель представления – связующее звено между первым и вторым блоками. Более подробное описание данного шаблона с точки зрения программирования выходит за пределы данной статьи и может быть найдено в специальной литературе.

Оценка качества сбора данных показала, что вычисление КП для всех населенных пунктов осуществляется без сбоев. На этапе тестирования решалась задача по установлению дня, который принимался за начальную точку наблюдений. Сбор КП можно проводить сразу, но его наблюдаемое значение не соответствует «истинному», свойственному данному погодному сервису. Поэтому наблюдаемое значение принималось в качестве истинного в день, когда в данном населенном пункте произошло «обнуление» КП в связи с выпавшими осадками. Сброс КП в зависимости от количества осадков за последние 24 ч подробно описан Л.И. Сверловой [8].

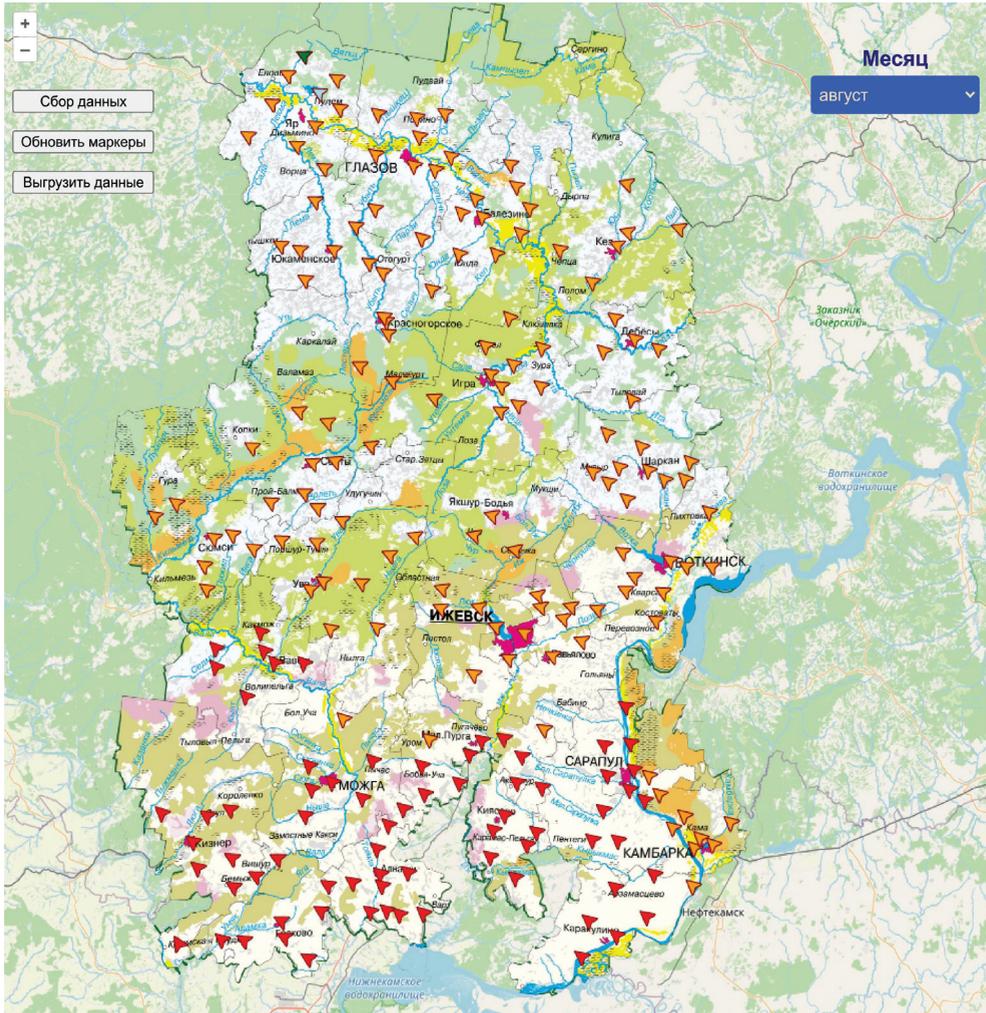


Рис. 1. Отображение маркеров КП на карте приложения на 26.08.2023 г.

Fig. 1. The display of markers of the comprehensive fire hazard indicator on the application map as of 26.08.2023

КП вычислялся по формуле:

$$\text{КП} = \sum_1^n K_v T(T - t),$$

где  $n$  – порядковый номер дня наблюдения;  $K_v$  – коэффициент, учитывающий скорость ветра;  $T$ ,  $t$  – температура воздуха и точки росы соответственно.

Ежедневным сбором данных и расчетом установлено, что для 95,2 % наблюдаемых населенных пунктов день отсчета КП наступил через 12 дней. То есть на 13-е сутки наблюдений сброс значений КП уже произошел для всех муниципальных образований, за исключением двух, и данные были готовы для накопления и последующего анализа. Пример роста КП и случаев его сброса за период наблюдения представлен на рис. 2 для г. Ижевска. График получен в результате обработки данных, выгруженных из предлагаемого приложения.

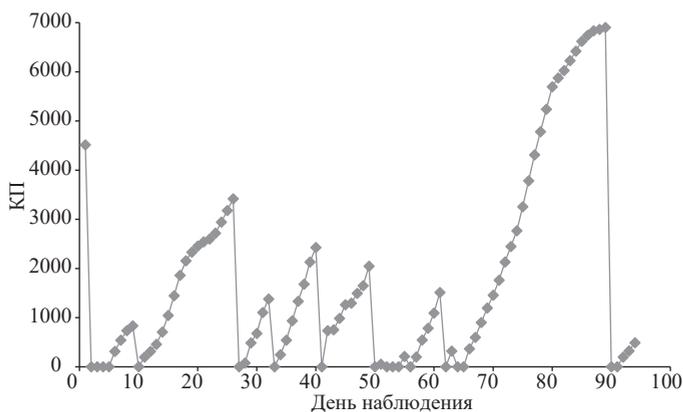


Рис. 2. Динамика изменения КП для г. Ижевска за 30.05.–01.09.2023 г.  
Fig. 2. The dynamics of changes in the comprehensive fire hazard indicator for the city of Izhevsk for 30.05–01.09.2023

В идеальном случае предполагалось, что маркеры КП будут относиться к точкам местности, на которой обозначены виды растительности, отдельно – древесных пород, наличие/отсутствие болот, торфяников и т. п. Однако такая реализация ограничена отсутствием погодных данных для точек наблюдения, имеющих соответствующие геокоординаты. Приемлемым вариантом решения данной проблемы стало «наложение» растровой карты на исходный слой цифровой карты в OpenLayers. Данный подход носит экспериментальный характер и в перспективе может стать основой для анализа взаимосвязи КП, случаев возгораний и пирологических свойств растительности на местности в муниципальных образованиях региона.

К сожалению, в исследовании не удалось сравнить «истинное» значение КП с получаемым с помощью OpenWeather. Если бы погодные данные запрашивались другим способом, например, через коммерческие Gismeteo API или API Яндекс.Погоды, то существовала бы вероятность отличия результирующих данных между собой. Однако было принято предположение, что сбор данных в одно время в течение многодневного периода наблюдений и посредством одного погодного сервиса позволит получить показатели, с достаточной точностью удовлетворяющие цели исследования.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

С помощью специально разработанного инструмента для многодневно-ного наблюдения за КП на территории Удмуртской Республики были установлены особенности его изменения в различных муниципальных образованиях. Во-первых, было обнаружено, что в пределах муниципального образования изменение КП вариативно, разница между значениями в населенных пунктах доходит до 100 %. Пример представлен на рис. 3. В скобках для населенных пунктов указано количество раз «сброса» КП вследствие достаточного количества выпавших осадков.

Отсюда следует, что для увеличения точности карты пожарной опасности в регионе нужно учитывать большее количество данных, которые могут быть получены с профессиональных коммерческих сервисов погоды и обработаны посредством современных подходов. По данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике насчитывается 1955 сельских населенных пунктов (по данным на 1 января 2022 г.).

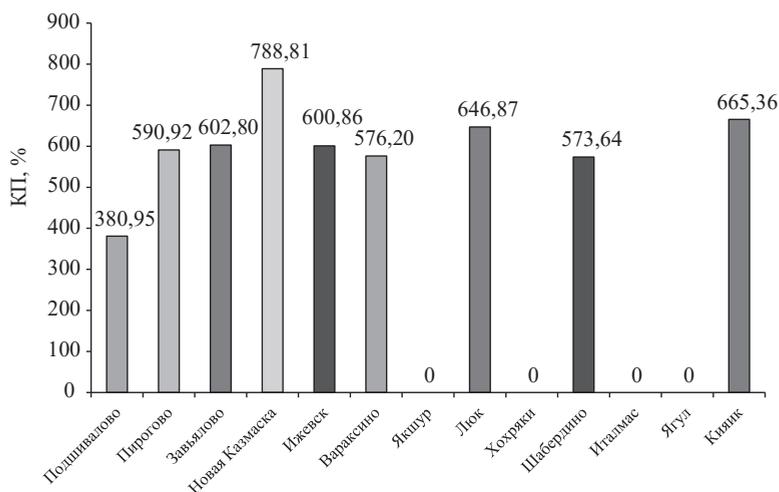


Рис. 3. Пример изменения КП в пределах Завьяловского района Удмуртской Республики на 05.08.2023: Подшивалово (13), Пирогово (13), Завьялово (12), Новая Казмаска (13), Ижевск (13), Вараксино (13), Якшур (14), Люк (15), Хохряки (15), Шабердино (13), Италмас (15), Ягул (15), Кияик (16)

Fig. 3. An example of a change in the comprehensive fire hazard indicator within the Zavyalovsky District of the Udmurt Republic as of 05.08.2023: Podshivalovo (13), Pirogovo (13), Zavyalovo (12), Novaya Kazmaska (13), Izhevsk (13), Varaksino (13), Yakshur (14), Lyuk (15), Kokhryakhi (15), Shaberdino (13), Italmas (15), Yagul (15), Kiyaiк (16)

Впервые установлен характер изменения КП в регионе по отношению к его протяженности, как по широте, так и по долготе. Статистическая обработка данных осуществлялась в MS Excel. Необходимо было получить ответ на вопрос о наличии корреляции между долготой/широтой пунктов наблюдения и КП. Построены диаграммы рассеяния 2 видов: «долгота–КП» и «широта–КП». Коэффициент корреляции вычислялся по формуле выборочного коэффициента корреляции Пирсона.

Диаграмма рассеяния КП для долготы за исследованный интервал времени представлена на рис. 4. По оси  $OY$  расположены суммы накопленных КП перед их обнулением для каждого населенного пункта (слагаемые сумм КП являются пиками по рис. 2). По оси  $OX$  отображены позиции координат долготы населенных пунктов в порядке убывания. То есть, чем ниже значение долготы, тем больше порядковый номер населенного пункта в рейтинге из 210 наименований. Перед вычислением коэффициента корреляции из выборки были удалены 4 выброса – в расчет попали только 206 населенных пунктов.

Установлено, что коэффициент корреляции Пирсона для данных рис. 4 равен 0,88. В случае использования линейной интерполяции зависимость изменения суммарных значений КП можно описать линейным уравнением типа  $kx + b$ .

Подобные шаги вычислений коэффициента для широты дают значение 0,31. В соответствии со шкалой Чеддока, представленной у С.С. Бондарчука с коллегой [1], для первого случая сила связи высокая, для второго – низкая.

Далее систематизировано сезонное распределение лесных пожаров (рис. 5), из которого следует, что максимальное количество пожаров приходится на май.

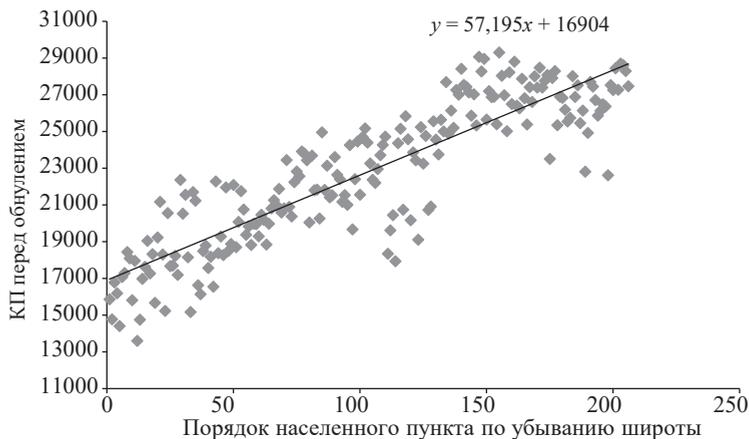


Рис. 4. Диаграмма рассеяния накопленных значений КП по мере убывания широты населенного пункта Удмуртской Республики

Fig. 4. The scatter diagram of accumulated comprehensive fire hazard indicator values as the latitude of a locality in the Udmurt Republic decreases

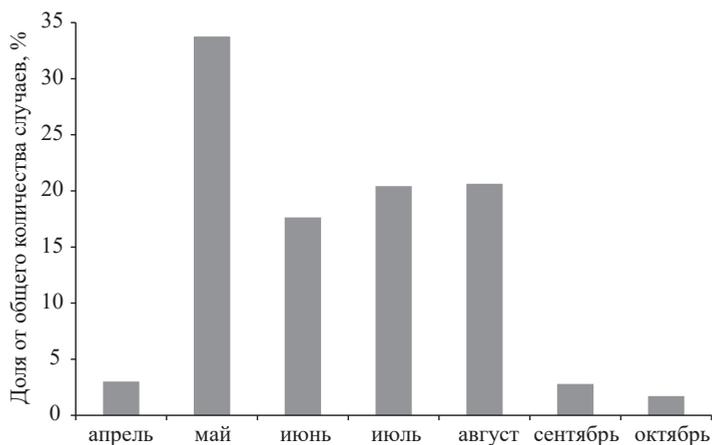


Рис. 5. Сезонное распределение лесных пожаров по Удмуртской Республике за 2011–2023 гг. (<https://minpriroda-udm.ru/lesnye-pozhary.html>)

Fig. 5. The seasonal distribution of forest fires in the Udmurt Republic for 2011–2023 (<https://minpriroda-udm.ru/lesnye-pozhary.html>)

Анализ случаев возникновения лесных пожаров за 2011–2023 гг. позволил выявить основные зоны аккумуляции возгораний в Удмуртской Республике в виде визуальных экранных форм в привязке к карте местности. Разработанное приложение отобразило данные рис. 5 непосредственно на карте исследуемого субъекта. Такая визуализация в привязке к муниципальным образованиям помогает лучше понять общую картину распределения пожаров, а в случае наличия данных по причинам пожаров будет способствовать разработке эффективных мер минимизации пожарных рисков в лесах. При отображении распределения лесных пожаров на карте (рис. 6), например, за май, следует, что ключевое сосредоточение лесных пожаров наблюдается в восточной и юго-восточной частях республики, не отличающихся большими площадями лесов.

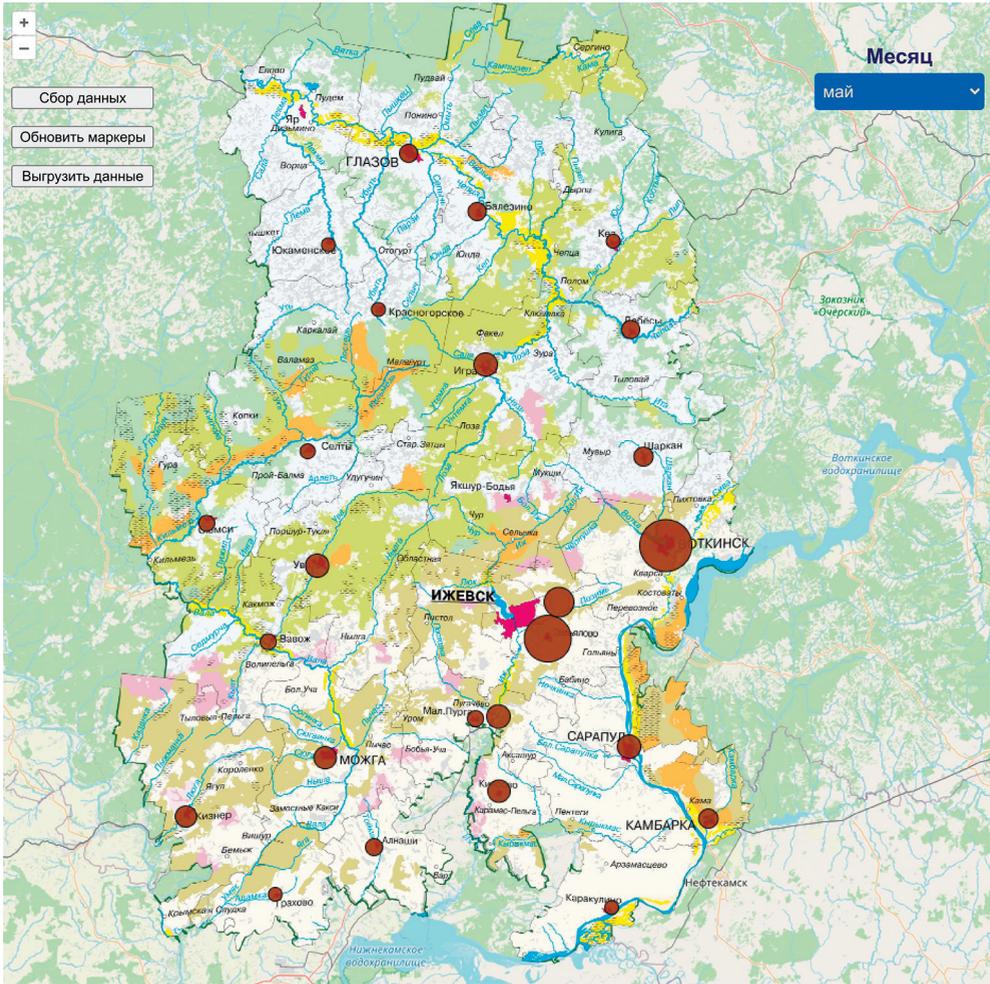


Рис. 6. Распределение лесных пожаров в Удмуртской Республике по муниципальным образованиям за май периода 2011–2023 гг.

Fig. 6. The distribution of forest fires in the Udmurt Republic by municipalities in May for the period of 2011–2023

### Заклучение

Проанализирован комплексный показатель пожарной опасности для территории Удмуртской Республики. Интервал наблюдения, реализованный с помощью спроектированного приложения, охвативший период с 30.05.2023 по 01.09.2023, составил 94 дня. Источником массивов погодных данных для 210 населенных пунктов, участвующих в расчете, стал онлайн сервис OpenWeather, в качестве картографической библиотеки использовался OpenLayers v6. В работе преследовалась цель изучения динамики изменения КП по территории региона.

Использована методика, в которой заложено, что комплексный показатель пожарной опасности сбрасывается, т. е. принимает нулевое значение, когда за предыдущие сутки пройдет определенное количество осадков. Чем больше комплексный показатель, тем большее количество осадков должно выпасть. Тем не менее, эти более жесткие условия обнуления по сравнению с приказом

Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 в результате выполненных исследований показали, что изменение комплексного показателя пожарной опасности наблюдается по долготе Удмуртской Республики. Иными словами, в южных широтах перед сбросом комплексный показатель имеет большее значение, чем в северных. Предположение, которое следует из этого наблюдения, заключается в том, что прямая, описывающая линейную интерполяцию данных изменений, из года в год будет иметь разный угол наклона.

Также было выявлено, что в пределах каждого из 25 муниципальных образований республики вариация комплексного показателя значительна и определяется количеством выпадающих осадков, температурой, а в целом динамикой погоды, не подчиняющейся административно-территориальному делению.

Ретроспективный анализ количества случаев лесных пожаров позволил установить, что большее число пожаров в период с апреля по октябрь приходится на май – 33,8 % всех возгораний за 2011–2023 гг., а источники возгораний принадлежат к муниципальным образованиям, центром которых являются крупные города. Поэтому, возможно, основные причины пожаров будут обусловлены антропогенным фактором.

Картографическая интерпретация проанализированных данных и подход, использованный в работе для их сбора, в перспективе с привязкой к карте растительности региона позволили бы оценить вероятность возникновения лесного пожара как в связи со значением КП, так и с учетом пирологических описаний таксационных выделов и причин, вызвавших пожары в прошлом. При ежегодных наблюдениях за комплексным показателем и наличии актуальной карты растительности реализовать подобный метод исследования возможно для любого региона России. Кроме того, совокупность результатов, полученных при помощи технологий детектирования температурных аномалий по данным спутниковых приборов, выявляющих факты действительного возгорания, и расчетных подходов станут основой теории построения прогнозных моделей возгорания. Однако при этом комплексный показатель должен соответствовать местоположению очага. Итоги исследования могут способствовать разработке и проведению мероприятий по предупреждению лесных пожаров и снижению ущерба от них в рамках общей системы наблюдения и контроля на региональном уровне.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бондарчук С.С., Бондарчук И.С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel. Томск: Том. гос. педагогич. ун-т, 2018. 433 с.

Bondarchuk S.S., Bondarchuk I.S. *Statistical Processing of Experimental Data in MS Excel*. Tomsk, Tomsk State Pedagogical University Publ., 2018. 433 p. (In Russ.).

2. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Клепко Е.А., Попков С.Ю., Иванова О.В. Комплексный показатель пожарной опасности в сельской местности России // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 2. С. 48–53.

Brushlinsky N., Sokolov S., Klepko E., Popkov S., Ivanova O. A Complex Index of Fire Risks in Rural Areas of Russia. *Pozhary i chrezvychajnye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2016, no. 2, pp. 48–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2016.2.48-53>

3. Волков С.Н., Налепин В.П., Дружининская К.А. Пожарная безопасность в лесах Тарногского лесничества Вологодской области // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2021. № 1(47). С. 29–33.

Volkov S.N., Nalepin V.P., Druzhininskaya K.A. Efire Safety in the Forests of the Tarnogsky Forestry of the Vologda Region. *Teoreticheskie i prikladnye problem agropromyshlennogo kompleksa* = Theoretical & Applied Problems of Agro-Industry, 2021, no. 1(47), pp. 29–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2021-47-1-29-33>

4. Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Региональные шкалы оценки пожарной опасности в лесу: усовершенствованная методика составления // Сиб. лесн. журн. 2016. № 2. С. 52–61.

Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A. Regional Scales of Fire Danger Rating in the Forest: Improved Technique. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 2, pp. 52–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170206>

5. Зверев А.П., Нурмагомедов Т.Н. Система поддержки принятия решений для предупреждения торфяных пожаров // Изв. Тульск. гос. ун-та. Науки о Земле. 2021. № 2. С. 30–37.

Zverev A.P., Nurmagomedov T.N. Decision Support System for Peat Fire Prevention. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o zemle*, 2021, no. 2, pp. 30–37. (In Russ.).

6. Подрезов Ю.В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 172–182.

Podrezov Yu.V. Principal Directions for Prevention of Emergency Fire Situations in Forests. *Lesnoj Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 172–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-172-182>

7. Раимбеков К.Ж. Комплексный показатель пожарной опасности сельской местности Республики Казахстан // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25, № 5. С. 52–56.

Raimbekov K.Zh. Complex Index of Fire Danger Rural Areas of the Republic of Kazakhstan. *Pozharovzryvobezопасnost'* = Fire and Explosion Safety, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 52–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.05.52-56>

8. Сверлова Л.И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года: метод. пособие. Хабаровск: Даль НИЦ Дальневост. УГМС, 2000. 48 с.

Sverlova L.I. *Method of Assessing Fire Hazard in Forests Based on Weather Conditions, Taking into Account Atmospheric Aridity Zones and Seasons of the Year*: Handbook. Khabarovsk, Far Eastern Research Center of the Far Eastern Administration of the Hydrometeorological Service, 2000. 48 p. (In Russ.).

9. Тимофеева С.С., Гармышев В.В., Астраханцева А.Ю. Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 4. С. 22–29.

Timofeeva S.S., Garmyshev V.V., Astrakhanseva A.Yu. Comparative Analysis of Environmental Risks of Wildfires in the Baikal Region. *Bezопасnost' tekhnogennykh i prirodnykh system* = Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29>

10. Удмуртская Республика: Энциклопедия. Ижевск: Удмуртия, 2000. 800 с.

*The Udmurt Republic: Encyclopedia*. Udmurtia, Izhevsk, 2000. 800 p. (In Russ.).

11. Alves D., Almeida M., Viegas D.X., Novo I., Luna M.Y. Fire Danger Harmonization Based on the Fire Weather Index for Transboundary Events between Portugal and Spain. *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 9, art. no. 1087. <https://doi.org/10.3390/atmos12091087>

12. Amri K., Sitanggang I.S. A Geographic Information System for Hotspot Occurrences Classification in Riau Province Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, vol. 24, pp. 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.017>

13. Chuvieco E., Aguado I., Yebra M., Nieto H., Salas J., Pilar Martín M., Vilar L., Martínez J., Martín S., Ibarra P., de la Riva J., Baeza J., Rodríguez F., Molina J.R., Herrera M.A., Zamora R. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using

Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>

14. *Fire Weather Index API*. OpenWeather Website. Available at: <https://docs.open-weather.co.uk/api/fire-index-api> (accessed 20.05.23).

15. Joint Research Centre (European Commission), San-Miguel-Ayaz J., Durrant T., Boca R., Libertà G., Branco A., De Rigo D., Ferrari D., Maiani P., Artés Vivancos T., Oom D., Pfeiffer H., Nuijten D., Leray T., Benchikha A., Abbas M., Humer F., Vacik H., Müller M., Konstantinov V., Pešut I., Kaliger A., Petkoviček S., Papageorgiou K., Toumasis I., Pecl J., Ruuska R., Chassagne F., Joannelle P., Gonschorek A., Theodoridou C., Debreceni P., Nagy D., Nugent C., Zaken Avi B., Di Fonzo M., Sciunnach R., Micillo G., Fresu G., Marzoli M., Ascoli D., Leisavnieks E., Jaunķļis Z., Mitri G., Repšienė S., Glazko Z., Assali F., Mharzi Alaoui H., Kok E., Stoof C., Maren van A.-J., Timovska M., Botnen D., Piwnicki J., Szczygieł R., Moreira J., Pereira T., Cruz M., Sbirnea R., Mara S., Eritsov A., Longauerová V., Jakša J., Lopez-Santalla A., Sandahl L., Beyeler S., Conedera M., Pezzatti B., Dursun K.T., Baltaci U., Gazzard R., Moffat A., Sydorenko S. *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018*. Publications Office of the European Union, 2019. <https://doi.org/10.2760/1128>

16. Lawson B.D., Armitage O.B. *Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Alberta, Edmonton, Northern Forestry Centre, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada. 84 p.

17. Li X., Zhao G., Yu X., Yu Q. A Comparison of Forest Fire Indices for Predicting Fire Risk in Contrasting Climates in China. *Natural Hazards*, 2014, no. 70, pp. 1339–1356. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0877-6>

18. Masinda M.M., Li F., Qi L., Sun L., Hu T. Forest Fire Risk Estimation in a Typical Temperate Forest in Northeastern China Using the Canadian Forest Fire Weather Index: Case Study in Autumn 2019 and 2020. *Natural Hazards*, 2022, vol. 111, pp. 1085–1101. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05054-4>

19. Mavsar R., González Cabán A., Varela E. The State of Development of Fire Management Decision Support Systems in America and Europe. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 29, pp. 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.009>

20. McInerney D., San-Miguel-Ayaz J., Corti P., Whitmore C., Giovando C., Camia A. Design and Function of the European Forest Fire Information System. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2013, no. 10, pp. 965–973(9). <https://doi.org/10.14358/PERS.79.10.965>

21. Rodriguez Aseretto D., Di Leo M., de Rigo D., Corti P., McInerney D., Camia A., San-Miguel-Ayaz J. Free and Open Source Software Underpinning the European Forest Data Centre. *Geophysical Research Abstracts*, 2013, vol. 15, art. no. 12101. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.155700>

22. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. *Applied Mathematical Sciences*, 2013, vol. 7, no. 5-8, pp. 271–286. <https://doi.org/10.12988/ams.2013.13025>

23. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1645–1658. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541>

24. Sevinç V. Mapping the Forest Fire Risk Zones Using Artificial Intelligence with Risk Factors Data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 4721–4732. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22515-w>

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

Научная статья

УДК 630\*181.1:630\*181.41

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-92-111

## Пространственное распределение сосновых лесов Кавказа

**Р.Х. Пшегусов**<sup>✉</sup>, *д-р биол. наук, зав. лаб.*; *ResearcherID: [I-8766-2012](https://orcid.org/0000-0002-6204-2690)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-2690>*

**В.А. Чадаева**, *д-р биол. наук, зав. лаб.*; *ResearcherID: [AAF-3095-2019](https://orcid.org/0000-0002-0788-1395)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0788-1395>*

Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, ул. И. Арманд, д. 37а, г. Нальчик, Россия, 360051; [p\\_rustem@inbox.ru](mailto:p_rustem@inbox.ru)<sup>✉</sup>, [v\\_chadayeva@mail.ru](mailto:v_chadayeva@mail.ru)

*Поступила в редакцию 02.05.23 / Одобрена после рецензирования 07.08.23 / Принята к печати 09.08.23*

**Аннотация.** Эффективным подходом к изучению факторов распространения лесобразующих видов Кавказа в условиях орографической труднодоступности горных территорий является сочетание использования геоинформационных систем и теории экологической ниши в моделях распределения SDM. Дискуссионными остаются многие аспекты данного подхода, в т. ч. выбор экологических предикторов, коллинеарность переменных, эффект масштаба исследуемой территории, формализация в моделях биотических факторов и расселительной способности видов. Цель статьи – выявить закономерности пространственного распределения сосновых лесов Кавказа (*Pinus sylvestris* L.) в зависимости от площади анализируемой территории. Для формализации биотического фактора распространения сосняков предложен метод включения карт распределения вероятностей обнаружения видов-конкурентов (березовые леса из *Betula pendula* Roth и *B. litwinowii* Doluch.) в SDM-модель *P. sylvestris* в качестве биотических факторов. Фактор расселительной способности сосны (доступности территорий) формализован через расстояние от оптимальных местообитаний вида (участков с порогом пригодности 0,8), на которых вероятность его обнаружения сохраняется выше 0,5. Сравнительный анализ разных наборов абиотических предикторов с учетом мультиколлинеарных переменных и без него выявил преимущества модели, полученной на основе набора данных ENVIREM (Environmental Rasters for Ecological Modeling), ограниченного VIF-тестом (Variance Inflation Factor). На локальном уровне (Центральный Кавказ) основным предиктором расположения сосновых лесов выступает доступность территорий – 0–3 км от оптимальных местообитаний (вклад в модель – около 72 %). На региональном уровне (Кавказ в целом) большое значение имеет межвидовая конкуренция (вклад в модель – около 37 %). Наименее значимы в распространении сосновых лесов основные абиотические факторы (орография местности и температурно-водный режим самого сухого квартала), долевое участие которых в итоговых моделях не превышает 16 %. Для вида установлено потенциально широкое распространение на Кавказе в районах с разнообразными климатическими и орографическими условиями (около 21 тыс. км<sup>2</sup>). Центр кавказского ареала сосны прогнозируется на Центральном Кавказе (96 % площади оптимальных местообитаний).

**Ключевые слова:** *Pinus sylvestris*, моделирование распространения, концепция ВМ, пространственный масштаб, Maxent, Кавказ

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках госзадания № 075-00347-19-00 по теме «Закономерности пространственно-временной динамики луговых и лесных экосистем в условиях горных территорий (российский Западный и Центральный Кавказ)».

*Для цитирования:* Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А. Пространственное распределение основных лесов Кавказа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 92–111. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-92-111>

Original article

## Spatial Distribution of Pine Forests in the Caucasus

**Rustam Kh. Pshegusov**<sup>✉</sup>, Doctor of Biology, Head of Laboratory;

ResearcherID: [I-8766-2012](https://orcid.org/0000-0002-6204-2690), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-2690>

**Victoria A. Chadaeva**, Doctor of Biology, Head of Laboratory;

ResearcherID: [AAF-3095-2019](https://orcid.org/0000-0002-0788-1395), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0788-1395>

Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories of the Russian Academy of Sciences, ul. I. Armand, 37a, Nalchik, 360051, Russian Federation; p\_rustem@inbox.ru<sup>✉</sup>, v\_chadayeva@mail.ru

Received on May 2, 2023 / Approved after reviewing on August 7, 2023 / Accepted on August 9, 2023

**Abstract.** An effective approach to studying the factors of distribution of forest-forming species of the Caucasus in conditions of orographic inaccessibility of mountainous areas is a combination of the use of geoinformation systems and the theory of ecological niche in SDM distribution models. Many aspects of this approach remain controversial, including the choice of ecological predictors, the collinearity of variables, the scale effect of the study area, the formalization of biotic factors and the dispersal capacity of species in models. The aim of this study has been to identify patterns of spatial distribution of pine (*Pinus sylvestris* L.) forests of the Caucasus depending on the area of the analyzed territory. To formalize the biotic factor of pine forest distribution, a method has been proposed for including probability distribution maps of the detection of competing species (birch (*Betula pendula* Roth and *B. litwinowii* Doluch.) forests) in the SDM model of *P. sylvestris* as biotic layers. The factor of pine dispersal capacity (accessibility of territories) has been formalized through the distance from the optimal habitats of the species (areas with a sustainability threshold of 0.8), where the probability of its detection remains above 0.5. A comparative analysis of different sets of abiotic predictors with and without multicollinear variables have revealed the advantages of the model based on the ENVIREM (Environmental Rasters for Ecological Modeling) dataset limited by the VIF (Variance Inflation Factor) test. At the local level (Central Caucasus), the main predictor of the location of pine forests is the accessibility of territories of 0–3 km from optimal habitats (the contribution to the model is about 72 %). At the regional level (Caucasus as a whole), interspecific competition is of great importance (the contribution to the model is about 37 %). The least significant factors in the distribution of pine forests are the main abiotic factors (orography of the area and the temperature and water regime of the driest quarter), the equity participation of which in the final models does not exceed 16 %. The species has been found to have a potentially wide distribution in the Caucasus in areas with diverse climatic and orographic conditions (about 21 thousand km<sup>2</sup>). The centre of the Caucasian pine range is predicted to be in the Central Caucasus (96 % of the optimal habitat area).

**Keywords:** *Pinus sylvestris*, distribution modelling, BAM concept, spatial scale, Maxent, the Caucasus

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the state assignment no. 075-00347-19-00 on the topic “Patterns of Spatial and Temporal Dynamics of Meadow and Forest Ecosystems in Mountainous Areas (Russian Western and Central Caucasus)”.

**For citation:** Pshegusov R.Kh., Chadaeva V.A. Spatial Distribution of Pine Forests in the Caucasus. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 92–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-92-111>

### *Введение*

Несмотря на относительно небольшую и фрагментированную площадь, леса Кавказа имеют важнейшее значение в обеспечении устойчивости горных территорий: играют средообразующую и средозащитную роли, способствуют поддержанию биоразнообразия, используются как рекреационные объекты, при производстве недревесных и древесных ресурсов и т. п. Между тем значительная часть горных лесных экосистем Кавказа подвержена уничтожению при заготовке лесоматериалов, строительстве дорожной и туристической инфраструктуры, в связи со вспышками численности вредителей, бактериальными заболеваниями и климатическими изменениями [1, 2, 4, 7, 10, 12]. Выявление закономерностей пространственного распределения главных лесообразующих видов Кавказа и основных экологических предикторов их распространения в локальном и региональном масштабах является фундаментальной задачей и способствует разработке стратегий и методов рационального использования и охраны лесных экосистем.

Сложность проведения подобных работ посредством традиционных наземных исследований в условиях горных территорий связана с орографической труднодоступностью ландшафтов и фрагментированностью лесов, определяющими недостаток объективной информации об их пространственно-временной динамике. Решение данной проблемы возможно с привлечением методов пространственного анализа, позволяющего с меньшими трудозатратами и высокой эффективностью выявить закономерности локализации древостоев. Одним из перспективных подходов является сочетание использования технологий, связанных с применением геоинформационных систем (ГИС) и теории экологической ниши в моделях распределения видов SDM (Species distribution models). При осуществлении соотнесения данных о количестве видов в природе (точек присутствия/отсутствия) и характеристик местообитаний (географические слои экологической информации) на основе машинного обучения [24] этот метод стал мощным инструментом анализа факторов пространственной локализации и картографирования потенциального распространения видов.

Несмотря на активное развитие SDM-моделирования, остаются дискуссионными многие концептуальные и методические вопросы, среди которых выбор оптимальных наборов экологических предикторов, проблема коллинеарности переменных, зависимость результатов моделирования от масштаба исследуемой территории, оценка и учет в моделях биотических факторов и расселительной способности видов. Принимая во внимание многообразие баз данных по окружающей среде и неравномерность распределения метеостанций, задачу выбора анализируемых экологических переменных правомерно признать нетривиальной. Выделение наиболее подходящих наборов экологических предикторов целесообразно для конкретных объектов и территорий с последующим анализом качества моделей и биологического смысла полученных результатов.

Использование в анализе коррелированных предикторов, по мнению одних авторов [38], может привести к ошибочным результатам, в то время как другие исследователи считают эффект устранения коллинеарных переменных незначительным [23] или даже нежелательным ввиду возможного удаления важных параметров среды [17]. Решающей в данном вопросе, на наш взгляд, является экспертная оценка результатов моделирования, полученных с использованием полного и ограниченного набора переменных.

Закономерности влияния экологических факторов, установленные в ходе крупномасштабных исследований, могут не подтверждаться при изучении пространственного распределения видов в конкретной местности. Согласно отдельным сообщениям [31], значимость абиотических предикторов расположения биологических объектов и их расселительной способности выше в разрезе крупных территориальных единиц (регион, континент), при этом в местных исследованиях более важны межвидовые взаимодействия. Однако в условиях горных территорий с многочисленными орографическими барьерами для расселения видов закономерности влияния масштаба территории на результаты моделирования могут отличаться от известных.

SDM-модели в основном включают только абиотические предикторы в рамках так называемого биоклиматического моделирования (bioclimate envelope modelling). В то же время, учитывая роль биотических взаимодействий в распределении видов, их принятие во внимание при анализе необходимо для получения биологически значимых результатов [33]. Формализация биотических факторов в моделях распространения видов в настоящее время является важной методической задачей. Сложная орографическая конфигурация района исследования также обуславливает возможность ведущей роли в пространственном распределении биологических объектов фактора доступности территорий, характеризующего расселительную способность видов.

Работы по моделированию распределения горных лесов Кавказа методами пространственного анализа крайне немногочисленны. В основном они посвящены ГИС-картированию лесного покрова или отдельных видов в конкретных регионах [7, 13, 16, 29, 37], редко на Кавказе в целом [20]. Отсутствует четкое понимание закономерностей и экологических предикторов распределения основных лесообразующих пород в регионе.

Данное исследование касается моделирования пространственного распределения на Кавказе сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. – одного из основных лесообразующих видов, имеющего большое ресурсное значение и природоохранную ценность. Объект моделирования – монодоминантные сосновые древостои, представляющие собой устойчивые климаксовые сообщества, индикаторы оптимальных местообитаний *P. sylvestris*. Использование присутствия подобных ценозов в качестве моделируемого события в пикселе анализируемой территории увеличивает вероятность обнаружения вида на прогнозируемых участках в ходе полевой верификации.

Цель исследования – выявить закономерности пространственного распределения сосновых лесов Кавказа в зависимости от масштаба анализируемой территории. Задачи: 1) определить абиотические предикторы для моделирования потенциального распространения сосновых лесов Кавказа; 2) выявить характер влияния абиотических, биотических факторов и способности *P. sylvestris* к расселению на локализацию сосняков в местном (Цен-

тральный Кавказ) и региональном (кавказский экорегион) масштабах. Гипотезы: 1) биотические факторы и способность *P. sylvestris* к расселению являются важными предикторами распределения сосновых лесов Кавказа; 2) пространственный масштаб во многом определяет закономерности воздействия экологических факторов на локализацию сосны в условиях горных территорий.

#### Объекты и методы исследования

Изучена горная территория площадью 390 тыс. км<sup>2</sup>, пролегающая между Азовским, Черным морями на северо-западе и до Каспийского моря на востоке, от Кумо-Манычской впадины на севере и до границ Армении, Грузии и Азербайджана с Ираном и Турцией на юге (рис. 1) и относящаяся к кавказскому экорегиону.

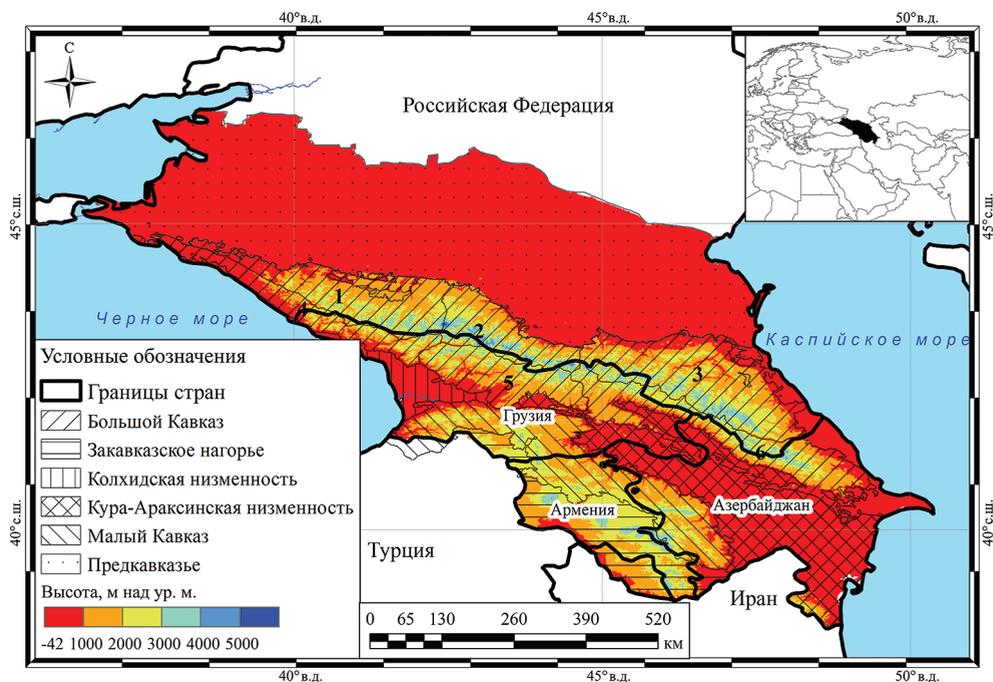


Рис. 1. Расположение и карта-схема района исследования (1, 2, 3 – Западный, Центральный и Восточный Кавказ (части Северного Кавказа) соответственно; 4, 5, 6 – Западное, Центральное и Восточное Закавказье соответственно)

Fig. 1. The location and schematic map of the study area (1, 2, 3 – Western, Central and Eastern Caucasus (parts of the North Caucasus), respectively; 4, 5, 6 – Western, Central and Eastern Transcaucasia, respectively)

Данная территория включает ряд основных климато-орографических областей в границах Российской Федерации, Грузии, Азербайджана и Армении: Предкавказье (Кубано-Приазовская и Терско-Кумская низменности, Ставропольская и Терско-Сунженская возвышенности, горы Минераловодской группы), Большой Кавказ (Западный, Центральный, Восточный), Закавказскую депрессию (Кура-Араксинская и Колхидская низменности), Малый Кавказ и Закавказское (Джавахетско-Армянское) нагорье [8]. Местность отличается разнообразием природно-климатических условий. Климат предгорий-среднегорий

Большого Кавказа – континентальный с теплым летом (Dfb, согласно классификации Кёппена–Гейгера), высокогорий – континентальный с прохладным летом (Dfc) и альпийский (ET) [36]. В отдельных районах Западного Кавказа, Западного Закавказья, а также Колхидской низменности и северо-запада Кура-Араксинской низменности превалирует влажный субтропический (Cfa) и океанический (Cfb) климат. В горах Малого Кавказа и Закавказского нагорья преобладает континентальный климат с теплым летом (Dfb). В связи с нарастанием для Кавказа общей сухости в юго-восточном направлении юго-восток Закавказского нагорья и Кура-Араксинской низменности представляется холодным полуаридным (BSk) [35]. Основные лесообразующие породы кавказского экорегиона – *Fagus orientalis* Lipsky, *Carpinus betulus* L., *P. sylvestris*, *Betula* L. spp. (*B. pendula* Roth, *B. litwinowii* Doluch., *B. pubescens* Ehrh.), *Quercus* L. spp. (*Q. robur* L., *Q. petraea* (Matt.) Liebl., *Q. iberica* Steven ex M. Bieb. и др.), а также *Picea orientalis* (L.) Peterm. и *Abies nordmanniana* (Steven) Spach на западе Большого Кавказа, *Juniperus excelsa* M. Bieb., *J. foetidissima* Willd. и *J. oxycedrus* L. в Закавказском нагорье.

Центральный Кавказ – около 20,5 тыс. км<sup>2</sup> – занимает наиболее высокогорную часть Большого Кавказа (200–5642 м над ур. м.). Климат горных районов этой территории – континентальный с прохладным летом (Dfc) и альпийский (ET) с возрастающей континентальностью и сухостью на градиенте высоты. Среднегодовое количество осадков здесь около 900 мм, среднесуточная температура – от 12,6 °С в июле до –6,7 °С в декабре (данные метеостанции с. Терскол, 2150 м над ур. м., верховья Баксанского ущелья, Кабардино-Балкарская Республика). На Центральном Кавказе сосредоточены основные сосновые массивы *P. sylvestris* кавказского экорегиона [9, 12], что обусловило выбор данной территории в качестве локального района исследования. Массивы из *B. pendula* и *B. litwinowii* в этой местности в основном образуют верхний лесной пояс, распространяясь также интразонально на лавинных и селевых конусах выноса на градиенте высот 1600–2800 м над ур. м. Древостои *F. orientalis* и *C. betulus* составляют леса предгорий и среднегорий.

Моделирование пространственного распределения *P. sylvestris* проводили в рамках концепции экологических ниш ВАМ [32, 33]. Данная концепция рассматривает 3 группы факторов, определяющих рассредоточение видов: биотические детерминанты (В-фактор, biotic), абиотические предикторы (А-фактор, abiotic) и способность видов к расселению, или фактор доступности территорий, (М-фактор, movement). Концепция ВАМ позволяет изучать влияние перечисленных типов факторов по отдельности (построение А-, ВА- и ВАМ-моделей) и интегрировать модели географического распределения отдельных видов в модели изучаемого объекта [32]. Соответственно, на 1-м этапе исследования мы построили А-модели пространственного распределения *P. sylvestris* на основе только абиотических переменных.

Наш подход к формализации биотического фактора в ВА-моделях заключался в использовании в качестве биотических слоев заранее созданных карт распределения вероятностей обнаружения монодоминантных березняков из *B. pendula* и *B. litwinowii*. Это основные виды-конкуренты *P. sylvestris* в кавказском экорегионе [35]. Основная зона пространственного пересечения 3 пород проходит по верхнему лесному поясу; борьба между ними проявляется также на вырубках, ветровалах, при смене сосновыми лесами березовых древоствоев в

ходе демулационной сукцессии на лавинных и селевых конусах выноса и т. п. Для учета в ВМ-моделях фактора перемещения, географически обозначающего доступные для расселения сосны регионы, рассчитывали расстояние от оптимальных местообитаний сосны (участков с порогом пригодности 0,8), на которых вероятность обнаружения *P. sylvestris* сохранялась выше 0,5 [35]. Полученный растр расстояний использовали в качестве слоя для построения ВМ-моделей.

Основные допущения моделей: расселительная способность вида (фактор перемещения) рассматривается не как биологическая характеристика вида, а с позиции доступности территорий (фрагментированности и изолированности пригодных для заселения участков); не учитывается антропогенный фактор локализации лесов Кавказа.

Точки присутствия *P. sylvestris*, *B. pendula* и *B. litwinowii* на Кавказе получены в ходе экспедиций 2012–2022 гг. и из Глобального информационного фонда по биоразнообразию GBIF [26] (табл. 1). Данные о встречаемости видов отфильтрованы для исключения записей вне естественного ареала и пространственно разрежены после проверки на наличие дубликатов до 1 точки на 1 км<sup>2</sup> ячейки сетки (функция clean duplicate в библиотеке ntbox в R). Всего в анализ включено 226 точек присутствия.

Таблица 1

**Данные о встречаемости видов, использованные в исследовании**  
**The data on the occurrence of species used in the study**

Вид	DOI из GBIF	GBIF-данные	Отфильтрованные GBIF-данные	Экспедиционные данные	Данные в анализе
<i>Pinus sylvestris</i>	10.15468/dl.ymbrx9	147	108	15	123
<i>Betula litwinowii</i>	10.15468/dl.wny9k8	70	52	6	58
<i>B. pendula</i>	10.15468/dl.ezr54q	86	32	13	45
<i>Итого</i>		303	192	34	226

Для сравнительного анализа предикторов (на примере Центрального Кавказа) использовали 2 набора экологических переменных: 1) биоклиматические характеристики BioClim базы WorldClim2 [42] и данные цифровой модели рельефа SRTM [39]; 2) климатические и топографические переменные ENVIREM (ENVIronmental Rasters for Ecological Modeling – набор слоев окружающей среды для экологического моделирования) [25, 40]. При отборе переменных анализировали также результаты моделирования с использованием полных наборов предикторов (модели ENVIREM и BioClim+SRTM) и наборов после устранения высоко коррелирующих переменных (модели ENVIREM\_VIF и BioClim+SRTM\_VIF). В последнем случае для ограничения переменных применяли тест VIF (Variance Inflation Factor – фактор инфляции дисперсии) в R с порогом  $VIF \leq 5$  (параметры не коррелируют или умеренно коррелируют между собой).

Разрешение полученных слоев для региональных SDM-моделей – 1 км/пикс. Слои для построения локальных моделей обрезаны по маске Центрального Кавказа (пакет R dismo [27]) и понижены в разрешении до 30 м/пикс. методом бикубической интерполяции сплайнами.

В качестве основного инструмента моделирования использована программа Maxent ver. 3.4.3 [18] в пакете R dismo [28] как один из наиболее эффективных, простых и надежных методов моделирования по точкам присутствия [34]. Применяли настройки программы: 10 000 фоновых точек; 5 репликаций при 20 % точек присутствия в качестве тестовой выборки; типы функций L, H, Q, LQ и LQH; диапазон множителя регуляризации 0,5–2,0 с шагом 0,5; максимум итераций – 500. Оптимальные модели из 20 для каждого набора предикторов (BioClim+SRTM и ENVIREM) определены в пакете ENMeval в R с использованием информационного критерия Акаике AICc [15], разницы между AICc и его минимальным значением deltaAICc, непрерывного индекса Бойса CBI [19], а также площади под операционной кривой приемника по данным обучения AUCtrain. Итоговые модели с наибольшими CBI и AUCtrain (площадь под операционной кривой приемника по данным обучения) и наименьшими AICc и deltaAICc представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Прогностическая эффективность и настройки оптимальных моделей Maxent для 2 наборов экологических переменных**  
**The predictive performance and settings of optimal Maxent models for 2 sets of environmental variables**

Набор переменных	AICc	DeltaAICc	CBI	AUCtrain	Тип функции	RM
BioClim+SRTM	1245,8	0	0,96	0,99	LQ	0,5
ENVIREM	2168,5	0	1,00	0,99	LQH	0,5

Примечание: RM, regularization multiplier – множитель регуляризации.

Важность предикторов оценивали по их процентному вкладу в модели Maxent и коэффициенту пермутации. Диапазоны оптимальных значений переменных получены из кривых отклика. Для лучших местообитаний использовали высокий порог пригодности 0,8, позволяющий снизить вероятность ложноположительных результатов. Для потенциальных местообитаний – 0,5. Прогностические карты распределения *P. sylvestris* создавали с помощью шкалы вероятности встречаемости вида от 0 до 1 в цветовой градации Maxent. Для этого выходные файлы Maxent были преобразованы в файлы netCDF с визуализацией в пакете tMap в R.

*Результаты исследования и их обсуждение*

*Выбор переменных окружающей среды.* Согласно значениям AUC, модели BioClim+SRTM и BioClim+SRTM\_VIF показали высокую прогностическую надежность (табл. 3). Вклад не менее 10–20 % в построение модели BioClim+SRTM вносят 6 переменных, из которых наиболее весомы bio13 (количество осадков самого влажного месяца) и bio1 (среднегодовая температура). Значения bio13 в оптимальных местообитаниях сосны в целом соответствуют диапазону среднемесячных осадков на Большом Кавказе в наиболее влажный весенне-летний период (90–120 мм с мая по июль). Интерпретация пригодности местообитаний сосны по параметру bio1 с диапазоном –5 ... +3 °C вызывает затруднение.

Таблица 3

**Вклад переменных BioClim и SRTM в модели Maxent пространственного  
распределения сосновых лесов на Центральном Кавказе**  
**The contribution of BioClim and SRTM variables to the Maxent models of spatial  
distribution of pine forests in the Central Caucasus**

BioClim+SRTM				BioClim+SRTM_VIF				
Переменная	PC, %	PI, %	Значение*	Переменная	PC, %	PI, %	Значение*	VIF
Bio13, мм	21,4	2,3	115–120	Bio15, %	50,1	70,5	23–25	2,44
Bio1, °C	19,7	15,4	–5...+3	Bio9, °C	41,3	25,4	–7...–3	2,73
Bio19, мм	12,1	0	180–190	Slope, °	6,7	3,4	3–10	2,55
Bio15, %	11,2	68,7	23–25	Aspect, °	2,3	0,6	0; 350	1,00
Bio14, мм	10,9	1,8	50–55	–	–	–	–	–
Bio18, мм	10,1	0,5	330–340	–	–	–	–	–
Slope, °	2,6	0,1	15–25	–	–	–	–	–
Aspect, °	1,1	0,1	0; 350	–	–	–	–	–
Bio9, °C	0	0	–7...–3	–	–	–	–	–
AUC±SD	0,99±0,002			AUC±SD	0,98±0,007			

Примечание: PC, percent contribution – процентный вклад переменной в построение моделей; PI, permutation impotence – коэффициент пермутации. \*Диапазон оптимальных значений параметров (0,8 – порог пригодности) из кривых отклика. Bio14 – количество осадков в наиболее сухой месяц; bio18 и bio19 – количество осадков в наиболее теплый и холодный кварталы соответственно; bio15 – сезонность осадков; bio9 – средняя температура наиболее сухого квартала; Slope – уклон; Aspect – экспозиция склона. Переменные BioClim приведены по [35]. AUC±SD – площадь под операционной кривой приемника±стандартное отклонение.

Интерпретация пригодности местообитаний сосны по параметру bio1 с диапазоном –5 ... +3 °C вызывает затруднение. На Кавказе устойчивые отрицательные значения среднегодовой температуры отмечены выше 2300–2500 м над ур. м. [8], т. е. у верхней высотной границы фактического распространения сосновых лесов. Диапазон оптимальных значений bio18 характеризует *P. sylvestris* как относительно засухоустойчивый вид, что подтверждают литературные данные [41]. Интерпретация влияния предикторов bio14 и bio19, характеризующих количество осадков в наиболее холодный период, учитывая зимний покой *P. sylvestris*, вызывает затруднение.

Тест VIF ограничил число предикторов в модели BioClim+SRTM\_VIF до 4. Параметры bio13, bio1 и bio19 были исключены из анализа как мультиколлинеарные (резко увеличивающие дисперсию оценки). Согласно модели BioClim+SRTM\_VIF, наибольшее значение для распространения монодоминантных сосняков на Центральном Кавказе имеет сезонность осадков bio15 с узким диапазоном оптимальных значений 23–25 %. Влияние данного фактора, вероятно, было «сглажено» за счет корреляции с удаленными из анализа предикторами. При этом в обеих моделях для bio15 свойствен крайне высокий коэффициент пермутации, отражающий зависимость точности моделей от изменения конкретной переменной в выборке тренировочных точек. Вторым по значимости предиктором модели является параметр bio9, воздействие которого в полной модели также было замаскировано. В обеих моделях топографические переменные крутизны и экспозиции склонов внесли наименьший вклад. При этом модель BioClim+SRTM прогнозирует вероятность обнаружения *P. sylvestris* более 80 % на покатых и средне крутых склонах (по классификации уклона поверхности в горах [6]), модель BioClim+SRTM\_VIF – на пологих

склонах. Обе модели предсказывают локализацию оптимальных местообитаний вида в северных частях.

Таким образом, полная модель BioClim+SRTM отличается большим числом предикторов с вкладом 10–20 %, наличием трудно интерпретируемых параметров в ряду случаев несоответствия оптимальных значений переменных фактической локализации сосновых лесов, а также сглаживанием влияния высоко значимого (согласно коэффициенту пермутации) фактора bio15, что свидетельствует не в пользу ее выбора для дальнейшего анализа.

Модели ENVIREM и ENVIREM\_VIF, согласно значениям AUC, также показали высокую надежность прогноза (табл. 4).

Таблица 4

**Вклад переменных ENVIREM в модели Maxent пространственного распределения сосновых лесов на Центральном Кавказе**  
**The contribution of ENVIREM variables to the Maxent models of spatial distribution of pine forests in the Central Caucasus**

ENVIREM				ENVIREM_VIF				
Переменная	PC, %	PI, %	Значение	Переменная	PC, %	PI, %	Значение	VIF
TRI	36,8	18,0	250–280	TRI	45,5	13,8	200–290	4,02
Continentality	24,2	14,8	17–18	PETDriestQuarter	44,8	44,7	21–35	4,90
PETDriestQuarter	21,1	35,0	21–35	EmbergerQ	9,2	37,2	110–115	4,35
AridityIndex-Thornthwaite	12,6	0,1	0–2	PETColdestQuarter	0,5	4,3	0–15	4,91
EmbergerQ	4,6	30,8	110–115	–	–	–	–	–
PETColdestQuarter	0	0,1	14–15	–	–	–	–	–
AUC±SD	0,99±0,003			AUC±SD	0,99±0,003			

Примечание: TRI – индекс неровности рельефа; PETDriestQuarter и PETColdestQuarter – среднемесячная потенциальная эвапотранспирация самых засушливого и холодного кварталов соответственно, мм/мес.; continentality – разница средних температур самых теплого и холодного месяцев, °C; embergerQ – плувиотермический коэффициент Эмбергера; aridityIndexThornthwaite – индекс засушливости Торнтвейта. Переменные ENVIREM приведены по [40].

Обе модели отличаются высоким вкладом топографического предиктора TRI, количественно характеризующего локальную расчлененность (неоднородность) рельефа. Значение TRI возрастает с увеличением крутизны склона [36], коррелируя с параметром Slope из набора данных SRTM. При этом оптимальный диапазон значений TRI в местообитаниях *P. sylvestris* соответствует умеренно крутым склонам (moderately rugged по классификации [36]), что точнее отражает реальную локализацию сосняков Центрального Кавказа. Высокий вклад в построение обеих моделей ENVIREM вносит также PETDriestQuarter с оптимальными значениями в интервале довольно низких величин. Данный параметр зависит от количества осадков и температуры воздуха, коррелируя с переменными bio9 и bio14 из набора BioClim. Индекс засушливости Торнтвейта и континентальность климата со вкладом более 10 % в полную модель ENVIREM удалены из модели ENVIREM\_VIF как высоко коллинеарные. При этом оптимальные значения индекса Торнтвейта соответствуют субгумидному типу климата (по классификации [30]), значения параметра continentality – умеренно выраженному континентальному климату, что в целом характерно для горных районов Центрального Кавказа. Отсечение данных переменных в модели

ENVIREM\_VIF привело к увеличению вклада параметра embergerQ с высоким коэффициентом пермутации в обеих моделях. Оптимальные значения этого параметра для местообитаний *P. sylvestris* соответствуют субгумидному типу климата (по классификации [22]), аналогичному согласно индексу Торнтвейта.

Таким образом, несмотря на совпадение отдельных предикторов (Slope и TRI, bio9 и PETDriestQuarter), модели BioClim+SRTM отличаются от моделей ENVIREM по набору основных значимых переменных. Для моделей ENVIREM характерно меньшее число предикторов со вкладом выше 10 %, а также относительно несложная интерпретация параметров по существующим шкалам [22, 30, 36]. Выше также степень соответствия оптимальных значений предикторов природно-климатическим условиям в местообитаниях *P. sylvestris*, в т. ч. для топографического параметра TRI. Климатические предикторы ENVIREM, такие как embergerQ и параметры эвапотранспирации, напрямую связаны с физиологическими и экологическими процессами в растительном покрове и эффективны для прогнозирования распределения биологических объектов [14, 40]. Кроме того, некоторые параметры объединяют в значительной степени коррелированные в горных условиях переменные, зависимые от интегрального фактора высоты над уровнем моря: TRI (высота над уровнем моря и крутизна склонов), embergerQ (температура и эвапотранспирация), aridityIndexThorntwaite (осадки и эвапотранспирация). Их использование в SDM-моделях, на наш взгляд, вносит вклад в решение проблемы большой коллинеарности экологических переменных для горных территорий. Перечисленные преимущества во многом определяют целесообразность применения данного набора предикторов в целях построения ВАМ-моделей пространственного распределения сосновых лесов.

Преимуществом ENVIREM\_VIF по сравнению с ENVIREM является меньшее число анализируемых предикторов с большим вкладом, а также устранение высоко коррелирующих переменных aridityIndexThorntwaite и continentality, маскирующих влияние предиктора embergerQ. Последний имеет значительный коэффициент пермутации в обеих моделях, а также может логически заменить индекс Торнтвейта при характеристике типа климата в районе исследования.

*Закономерности локализации сосновых лесов Кавказа в зависимости от масштаба исследуемой территории.* Все модели пространственной локализации монодоминантных сосновых древостоев на Кавказе показали высокую прогностическую точность согласно значениям AUC (табл. 5).

Таблица 5

**Вклад основных экологических переменных в модели Maxent локализации *Pinus sylvestris* на Кавказе**  
**The contribution of key environmental variables to the Maxent model of *Pinus sylvestris* localization in the Caucasus**

Переменная	А-модель			ВА-модель			ВАМ-модель		
	PC, %	PI, %	Значение	PC, %	PI, %	Значение	PC, %	PI, %	Значение
<i>Центральный Кавказ</i>									
TRI	45,5	13,8	200–300	24,6	19,7	260,0–290	5,7	30,6	260,0–290
PETDriestQuarter, мм/мес.	44,8	44,7	21–35	34,8	52,5	21,0–35	8,8	48,8	22,0–35
EmbergerQ	9,2	37,2	110–115	1,7	6,2	110,0–115	0,2	0,6	110,0–115
<i>Betula litwinowii</i>	–	–	–	31,2	2,2	0,8–1	7,7	3,0	0,8–1

Окончание табл. 5

Переменная	А-модель			ВА-модель			ВАМ-модель		
	PC, %	PI, %	Значение	PC, %	PI, %	Значение	PC, %	PI, %	Значение
<i>B. pendula</i>	–	–	–	4,8	0,1	0,8–1	5,5	0,5	0,8–1
Подвижность вида, км	–	–	–	–	–	–	71,8	12,1	0–3
AUC±SD	0,99±0,003			0,99±0,002			0,99±0,002		
<i>Кавказ</i>									
TRI	66,7	42,4	80–550	19,9	4,6	350–550	15,9	22,7	80–600
PETDriestQuarter, мм/мес.	12,2	13,1	15–20	0,4	2,0	15–20	0,1	0,6	15–20
<i>Betula litwinowii</i>	–	–	–	25,3	17,1	0,2–1	26,9	6,9	0,2–1
<i>B. pendula</i>	–	–	–	32,2	38,9	0,2–1	10,4	10,4	0,3–1
Подвижность вида, км	–	–	–	–	–	–	39,5	27,0	0–10
AUC±SD	0,97±0,003			0,98±0,002			0,98±0,002		

Примечание: Встречаемость *Betula litwinowii* и *B. pendula* – вероятность обнаружения видов берез на участках с порогом пригодности среды обитания 0,8 для *Pinus sylvestris*; подвижность вида – расстояние от оптимальных местообитаний сосны, на которых вероятность обнаружения вида сохранялась выше 0,5.

Согласно локальной А-модели, основными абиотическими предикторами распространения сосновых лесов являются TRI и PETDriestQuarter, в меньшей степени – embergerQ. Значения данных параметров характеризуют оптимальные местообитания *P. sylvestris* на умеренно крутых склонах в условиях субгумидного климата. При этом площадь оптимальных местообитаний сосновых древостоев на Центральном Кавказе составляет 83 % от таковой в границах всего кавказского экорегиона (табл. 6). Концентрирование оптимальных местообитаний *P. sylvestris* на Центральном Кавказе подтверждено данными наземных наблюдений и результатами картографирования лесов [9, 12]. Эта закономерность может быть связана с локализацией в указанном районе сосновых древостоев в межледниковую эпоху и их постепенным расселением из высокогорных рефугиумов, о наличии которых здесь пишут исследователи [3, 13]. Определенное значение при этом может иметь высокий уровень горно-механической изоляции, препятствующий быстрому расселению сосны. В пользу последнего свидетельствуют результаты геногеографического анализа, показавшие обособление популяций *P. sylvestris* из Приэльбрусья и Карачаево-Черкессии на уровне географических рас [9].

Таблица 6

**Площади пригодных и оптимальных местообитаний сосновых лесов Кавказа согласно моделям Maxent**  
**The areas of suitable and optimal habitats of pine forests of the Caucasus according to Maxent models**

Регион	Территория, тыс. км <sup>2</sup>					
	пригодная			оптимальная		
	А-модель	ВА-модель	ВАМ-модель	А-модель	ВА-модель	ВАМ-модель
Центральный Кавказ	19,5	18,8	17,6	7,7	6,9	5,3
Кавказ	41,3	30,9	21,1	9,3	8,9	5,5

На региональном уровне потенциальное распространение сосновых лесов, согласно А-модели, в основном определяется топографическим фактором TRI на фоне относительно низкого вклада климатических предикторов. При этом оптимальные местообитания *P. sylvestris* на Кавказе в целом характеризуются широким диапазоном значений TRI (склоны от почти ровных до сильно крутых по классификации [36]) в районах с невысокой среднемесячной потенциальной эвапотранспирацией сухого квартала. Широкий диапазон экологической толерантности *P. sylvestris* к основным факторам среды и относительная независимость вида от климатических параметров подтверждены также ранее проведенными исследованиями сосняков в Республике Дагестан [5]. Отмечена засухоустойчивость *P. sylvestris* в Турции [41] и толерантность вида к избыточному увлажнению на Южном Урале [11].

Соответственно выявленным значениям ведущих предикторов основные массивы сосновых лесов Центрального Кавказа прогнозируются по горным ущельям в менее влагообеспеченных западных районах на склонах разной экспозиции Главного Кавказского и Бокового хребтов (рис. 2, а). Предсказание распространения сосновых древостоев на южных склонах, интенсивно используемых ранее под горные пастбища, подтверждается наблюдаемым в настоящее время активным заселением этих территорий подростом *P. sylvestris* в условиях резкого снижения поголовья выпасаемого скота.

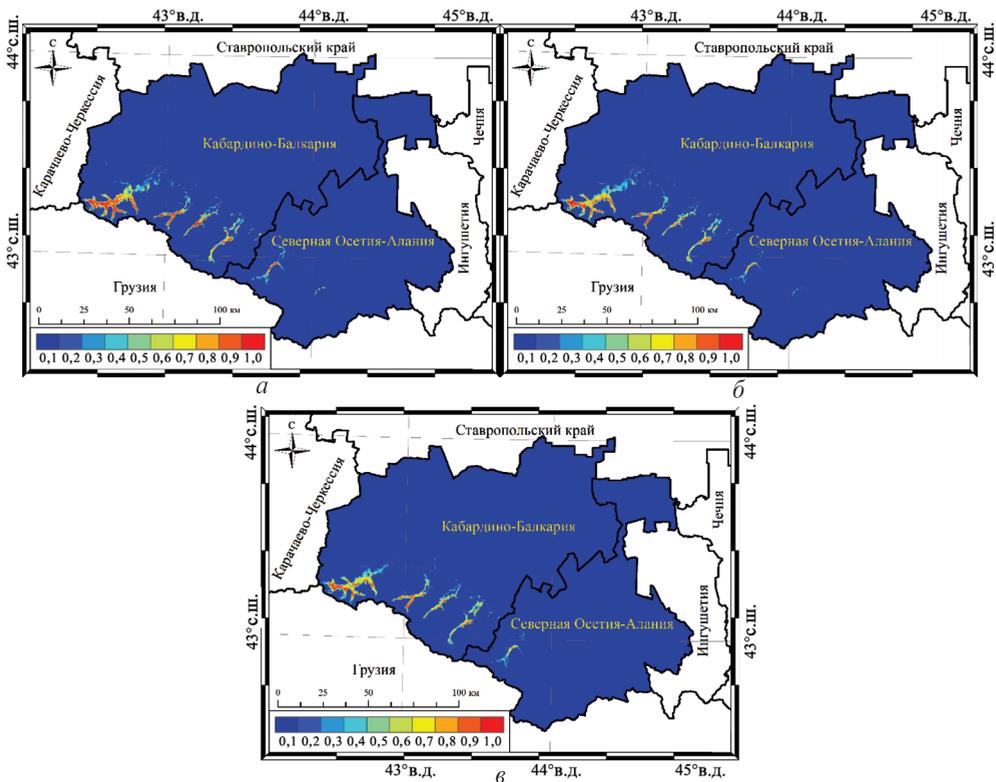


Рис. 2. Карты потенциального распространения *Pinus sylvestris* на Центральном Кавказе согласно А-модели (а), ВА-модели (б) и ВАМ-модели (в). 0,1–1 – вероятность обнаружения вида

Fig. 2. The maps of potential distribution of *Pinus sylvestris* in the Central Caucasus according to the A-model (a), VA-model (b) and BAM-model (v). 0.1–1 is the probability of the species occurrence

Места, оптимальные для *P. sylvestris* на Кавказе, широко представлены в среднегорьях-высокогорьях всего экорегиона с разнообразными климатическими и орографическими условиями (рис. 3, а).

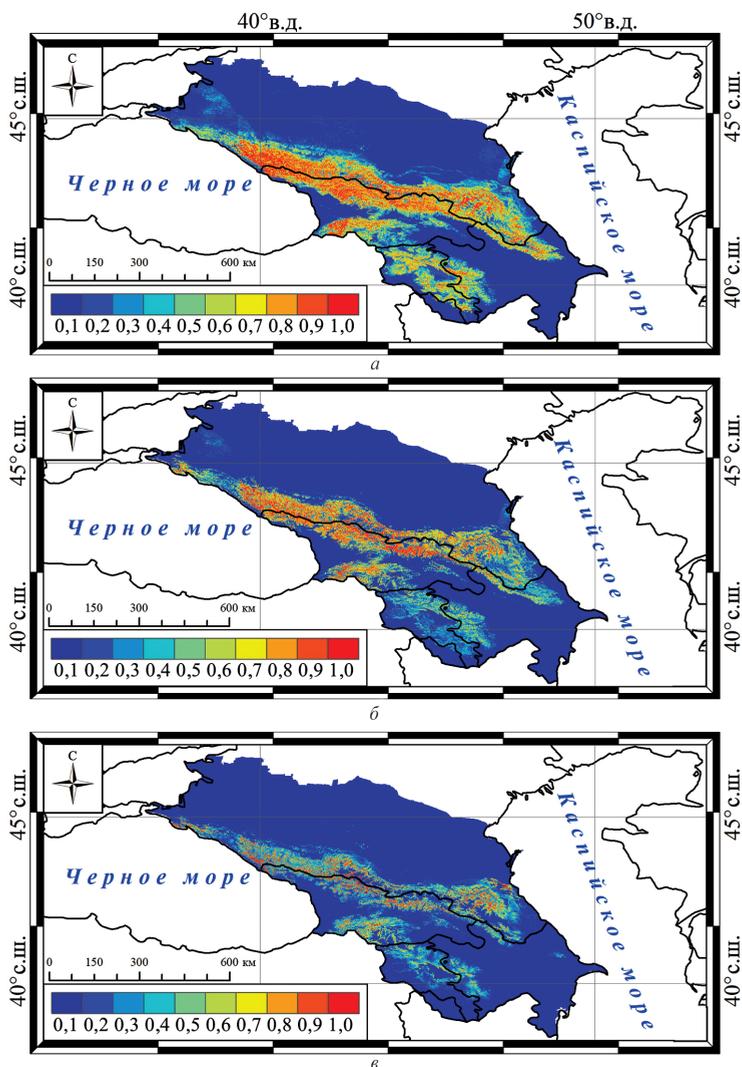


Рис. 3. Карты потенциального распространения *Pinus sylvestris* на Кавказе согласно А-модели (а), ВА-модели (б) и ВАМ-модели (в)

Fig. 3. The maps of potential distribution of *Pinus sylvestris* in the Caucasus according to the A-model (а), VA-model (б) and BAM-model (в)

Согласно локальной ВА-модели, большое значение в пространственном распределении сосновых лесов имеет конкуренция со стороны *B. litwinowii* со вкладом около 31 %. Территории, оптимальные для произрастания сосновых лесов на Центральном Кавказе, также с высокой вероятностью (0,8–1,0) могут быть заняты горными березняками.

*B. litwinowii* и *B. pendula* часто образуют смешанные древостои верхнего лесного пояса гор Кавказа, ниже которого расположен пояс мономерных сосновых или березово-сосновых насаждений. В то же время биотические предикторы локальной ВА-модели характеризуются низким коэффициентом

пермутации, а значимость абиотических факторов (TRI и PETDriestQuarter) в распространении сосны в локальной ВА-модели остается достаточно высокой. Как светолюбивый вид *P. sylvestris* избегает конкуренции благодаря расположению взрослых деревьев в верхнем ярусе леса, исключая подавление со стороны других видов [21, 27]. Пионерный характер сосны позволяет ей закрепиться на ранней стадии сукцессии с последующим занятием верхнего яруса древостоев [21]. Так, в пихтово-буковых лесах на северо-западе Турции сосна демонстрирует случайное распределение и пространственную ассоциацию с другими видами, что свидетельствует об отсутствии выраженного угнетающего эффекта со стороны сопутствующих видов [21]. В снижении конкуренции *P. sylvestris* с другими видами, вероятно, имеет значение также ее экологическая пластичность и способность занимать относительно мало пригодные местообитания.

Оптимальные значения абиотических переменных в локальной ВА-модели в целом сохраняются, за исключением диапазона значений TRI, нижняя граница которого под влиянием фактора конкуренции сместилась в область умеренно крутых склонов (по [36]). Соответственно, прогнозируемая локальной ВА-моделью площадь оптимальных местообитаний *P. sylvestris* сократилась на 10,4 % – достаточно равномерно в прежних местах локализации вида (рис. 2, б).

С увеличением анализируемой территории до регионального уровня влияние климатических и орографических факторов уступает суммарному воздействию межвидовой конкуренции. С другой стороны, вероятность обнаружения *B. pendula* и *B. litwinowii* в местообитаниях, оптимальных для сосны, варьирует в широких пределах – от 0,2 до 1,0. Значимое воздействие на распределение *P. sylvestris*, согласно региональной ВА-модели, сохраняет параметр TRI, нижние значения которого перешли в область умеренно крутых склонов на больших высотах. Площадь оптимальных местообитаний сосны на Кавказе под влиянием фактора межвидовой конкуренции уменьшилась на 4 %, площадь потенциально пригодных местообитаний – на 25 % (рис. 3, б).

Способность *P. sylvestris* к расселению, или фактор доступности территорий, играет большую роль в распространении вида согласно обеим ВА-моделям, однако в локальном масштабе влияние данного предиктора значительно выше (вклад около 72 %). TRI и межвидовая конкуренция сохраняют значимое влияние на распределение сосновых лесов в региональном масштабе. Подвижность сосны на локальном уровне ограничена 0–3 км от оптимальных местообитаний, в региональном масштабе данный показатель достигает 0–10 км. Данные результаты соответствуют приведенным сведениям о низкой скорости расселения *P. sylvestris* [9]. Относительно ВА-модели площадь оптимальных для вида территорий на Центральном Кавказе уменьшилась на 23 %, составив 5,3 тыс. км<sup>2</sup>, что немногим меньше размера лучших местообитаний сосны на Кавказе.

Выявленные закономерности противоречат теории о преобладании роли биоклиматических переменных и фактора мобильности в крупномасштабных моделях распространения видов и большему значению межвидовых взаимодействий на локальном уровне [31]. На наш взгляд, эти несоответствия связаны со спецификой исследований в горах, где расселению видов в первую очередь препятствует локальная горно-механическая изоляция.

### Заключение

Модели ENVIREM пространственного распределения сосновых лесов Центрального Кавказа выгодно отличаются от моделей BioClim+SRTM меньшим числом значимых предикторов со вкладом более 10 %, несложной интерпретацией переменных по существующим шкалам, соответствием оптимальных значений предикторов природно-климатическим условиям района исследования и фактическому распределению сосняков, а также высоким вкладом топографического параметра, что соответствует логике исследования в горах. Устранение мультиколлинеарных переменных с помощью теста VIF привело к выделению меньшего числа значимых предикторов без усложнения интерпретируемости результатов. Соответственно, набор переменных ENVIREM, отобранных с использованием теста VIF, был назван наиболее подходящим для моделирования распространения сосняков Кавказа.

Основными абиотическими предикторами локализации сосновых лесов Центрального Кавказа являются индекс неровности рельефа TRI и среднемесячная потенциальная эвапотранспирация самого сухого квартала PETDriestQuarter, оптимальные значения которых соответствуют достаточно засушливым участкам умеренно крутых склонов. Вклад данных факторов остается высоким в ВА-модели (около 59 %) с учетом фактора конкуренции со стороны горных березняков (примерно 36 %). В локальной ВАМ-модели наиболее выражено влияние фактора доступности территорий (72 %), однако для абиотических предикторов сохраняется высокий коэффициент пермутации (31–49 %). В региональном масштабе доля основных абиотических факторов (TRI и PETDriestQuarter) в ВА-модели не превышает 20 %. Большее значение для распространения сосновых лесов на Кавказе в целом имеет межвидовая конкуренция (57,5 %). Вклад фактора доступности территорий в построение региональной ВАМ-модели (39 %) в 2 раза меньше по сравнению с локальной моделью. Таким образом, с увеличением анализируемой территории значение абиотических переменных и фактора подвижности в распространении *P. sylvestris* на Кавказе снижается, возрастает роль межвидовых взаимодействий. На локальном уровне, напротив, местоположение сосновых лесов в большей степени определяется биоклиматическими параметрами и доступностью территорий, что в целом логично, учитывая высокий уровень локальной горно-механической изоляции.

Распространение основных массивов сосняков Центрального Кавказа спрогнозировано по горным склонам ущелий в наиболее засушливых западных районах. На Кавказе в целом потенциальные местообитания *P. sylvestris* широко представлены в горных районах с разнообразными климатическими и орографическими условиями. При этом, согласно ВАМ-моделям, площадь оптимальных местообитаний вида на Центральном Кавказе составляет около 96 % от таковой для всего экорегиона. Расположение здесь основы кавказского ареала сосны может быть обусловлено локализацией на данной территории межледниковых рефугиумов вида и медленным расселением сосны из-за горно-механической изоляции (подвижность вида – 0–3 км от оптимальных участков).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акатов В.В., Акатов П.В., Майоров С.В. Тенденции изменения высотного ареала пихты нордмана на Западном Кавказе (бассейн р. Белая) // Изв. Рос. акад. наук. Сер.: Географич. 2013. № 2. С. 104–114.
- Akatov V.V., Akatov P.V., Majorov S.V. Trends in Altitude Area of Nordmann Fir in the Western Caucasus (Basin of Belaya River) in the Relation with the Global Warming Issue. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya: Geograficheskaya*, 2013, no. 2, pp. 104–114. (In Russ.).
2. Бебия С.М. Лесные ресурсы Черноморского побережья Кавказа: проблемы и перспективы их рационального использования // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 9–24.
- Bebia S.M. Forest Resources of the Caucasian Black Sea Coast: Problems and Prospects of Rational Use. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 1, pp. 9–24. (In Russ.).
3. Галушко А.И. Основные рефугиумы и реликты в высокогорной флоре западной части Центрального Кавказа // Проблемы ботаники. Растительный мир высокогорий и его освоение. Л.: Наука, 1974. Т. 12. С. 19–26.
- Galushko A.I. Main Refugia and Relics in the Highland Flora of the Western Part of the Central Caucasus. *Problems of Botany. Highland Flora and Its Development*. Leningrad, Nauka Publ., 1974, vol. 12, pp. 19–26. (In Russ.).
4. Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Ручинская Е.В., Тебенкова Д.Н. Оценка сукцессионного статуса хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе популяционного подхода // Лесоведение. 2018. № 4. С. 243–257.
- Gornov A.V., Gornova M.V., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N. Population-Based Assessment of Succession Stage of Mixed Forests in European Part of Russia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 4, pp. 243–257. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114818040083>
5. Ермаков Н.Б., Абдурахманова З.И., Потепенко И.Л. К проблеме синтаксономии сосновых лесов (*Pinus sylvestris* var. *hamata*) с участием бореальных флористических элементов в Дагестане (Северный Кавказ) // Turczaninowia. 2019. Т. 22, № 4. С. 154–171.
- Ermakov N.B., Abdurakhmanova Z.I., Potapenko I.L. To the Problem of Syntaxonomy of Pine Forests (*Pinus sylvestris* var. *hamata*) with the Participation of Boreal Floristic Elements in Dagestan (North Caucasus). *Turczaninowia*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 154–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.22.4.16>
6. Жучкова В.К., Раковская Э.М. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Академия, 2004. 368 с.
- Zhuchkova V.K., Rakovskaya E.M. *Methods of Complex Physical and Geographical Research*. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 368 p. (In Russ.).
7. Комарова А.Ф., Куксина Н.В., Зудкин А.Г. Картографирование темнохвойных лесов Северо-Западного Кавказа методом нейронных сетей // Соврем. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 157–166.
- Komarova A.F., Kuksina N.V., Zudkin A.G. Mapping of the North-West Caucasus Dark-Coniferous Forests with Neural Network Approach. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, vol. 13, no. 5, pp. 157–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-157-166>
8. Мильков Ф.Н. Физическая география СССР. Общий обзор. Европейская часть СССР. Кавказ. М.: Мысль, 1976. 448 с.
- Milkov F.N. *Physical Geography of the USSR. General Overview. European Part of the USSR. The Caucasus*. Moscow, Mysl' Publ., 1976. 448 p. (In Russ.).
9. Петрова И.В., Санников С.Н., Темботова Ф.А., Санникова Н.С., Фарзалиев В.С., Моллаева М.З., Егоров Е.В. Геноеография популяций *Pinus sylvestris* L. Большого Кавказа и Крыма // Экология. 2017. № 6. С. 431–439.

Petrova I.V., Sannikov S.N., Tembotova F.A., Sannikova N.S., Farzaliev V.S., Mol- laeva M.Z., Egorov E.V. Genogeography of Populations of *Pinus sylvestris* L. of the Greater Caucasus and Crimea. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 2017, no. 6, pp. 431–439. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S036705971706004X>

10. Пукинская М.Ю., Кессель Д.С., Щукина К.В. Усыхание пихто-ельников Тебердинского заповедника // Ботан. журн. 2019. Т. 104, № 3. С. 337–362.

Pukinskaya M.Yu., Kessel D.S., Shchukina K.V. Drying of Fir-Spruce Forests of the Teberda Nature Reserve. *Botanicheskij zhurnal*, 2019, vol. 104, no. 3, pp. 337–362. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813619030062>

11. Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Латыпов Е.Р. Моделирование условий произрастания и анализ вклада факторов в формирование высокобонитетных насаждений сосны (*Pinus sylvestris* L.) в программе Maxent (на примере Бугульминско-Белебеевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан) // Природообустройство. 2017. № 3. С. 104–111.

Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Latypov E.R. Simulation of Growing Conditions and Analysis of Factors Contribution in Formation of High Bonitet Plantings of Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Program Maxent (by the Example of the Bugulminsko-Belebeevsky Upland within the Republic of Bashkortostan. *Prirodoobustrojstvo*, 2017, no. 3, pp. 104–111. (In Russ.).

12. Темботова Ф.А., Пшегузов Р.Х., Тлупова Ю.М., Темботов Р.Х., Ахомготов А.З. Состояние лесных экосистем горных территорий Кабардино-Балкарии по данным дистанционного зондирования // Изв. Рос. акад. наук. Сер.: Географич. 2012. № 6. С. 89–97.

Tembotova F.A., Pshegusov R.Kh., Tlupova Yu.M., Tembotov R.Kh., Akhomgotov A.Z. The Data on Remote Sensing and Possibility of Their Use to Evaluate the Performance of Forest Ecosystems in Mountain Territories (a Case Study of the Kabardino-Balkar Republic). *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Seriya: Geograficheskaya*, 2012, no. 6, pp. 89–97. (In Russ.).

13. Тумаджанов И.И. История лесов Северного Кавказа в голоцене // Вопросы голоцена. Вильнюс, 1961. С. 249–266.

Tumadzhyanov I.I. History of the North Caucasus Forests in the Holocene. *Voprosy golotsena*. Vilnius, 1961, pp. 249–266. (In Russ.).

14. Adhikari D., Singh P.P., Tiwary R., Barik S., Barik S.K. Modelling the Environmental Niche and Potential Distribution of *Magnolia campbellii* Hook. f. & Thomson for its Conservation in the Indian Eastern Himalaya. *Plants of Commercial Values*. India, New Delhi, New India Publ. Agency, 2019, pp. 79–88.

15. Akaike H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, iss. 6, pp. 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>

16. Akobia I., Janiashvili Z., Metreveli V., Zazanashvili N., Batsatsashvili K., Ugrekheidze K. Modelling the Potential Distribution of Subalpine Birches (*Betula* spp.) in the Caucasus. *Community Ecology*, 2022, vol. 23, pp. 209–218. <https://doi.org/10.1007/s42974-022-00097-4>

17. Araújo M.B., Peterson A.T. Uses and Misuses of Bioclimatic Envelope Modeling. *Ecology*, 2012, vol. 93, iss. 7, pp. 1527–1539. <https://doi.org/10.1890/11-1930.1>

18. Baldwin R.A. Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research. *Entropy*, 2009, vol. 11, no. 4, pp. 854–866. <https://doi.org/10.3390/e11040854>

19. Boyce M.S., Vernier P.R., Nielsen S.E., Schmiegelow F.K.A. Evaluating Resource Selection Functions. *Ecological Modelling*, 2002, vol. 157, iss. 2–3, pp. 281–300. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00200-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00200-4)

20. Buchner J., Yin H., Frantz D., Kuemmerle T., Askerov E., Bakuradze T., Bleyhl B., Elizbarashvili N., Komarova A., Lewińska K.E., Rizayeva A., Sayadyan H., Tan B., Tepanosyan G., Zazanashvili N., Radeloff V.C. Land-Cover Change in the Caucasus Mountains Since 1987

Based on the Topographic Correction of Multi-Temporal Landsat Composites. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 248, art. no. 111967. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111967>

21. Çoban S. Spatial Stand Structure Analysis of Uludağ Fir Forests in the Northwest of Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, vol. 18(5), pp. 7353–7367. [https://doi.org/10.15666/aeer/1805\\_73537367](https://doi.org/10.15666/aeer/1805_73537367)

22. Daget Ph., Ahdali L., David P. Mediterranean Bioclimate and its Variation in the Palaearctic Region. *Mediterranean-Type Ecosystems. Tasks for Vegetation Science*. Dordrecht, Springer, 1988, vol. 19, pp. 139–148. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-3099-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3099-5_6)

23. De Marco P.J., Nóbrega C.C. Evaluating Collinearity Effects on Species Distribution Models: An Approach Based on Virtual Species Simulation. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13(9), art. no. e0202403. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202403>

24. Elith J., Franklin J. Species Distribution Modeling. *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*. Oxford, Academic Press, 2013, pp. 692–705. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00318-X>

25. ENVIREM. *Environmental Rasters for Ecological Modeling*, 2023. Available at: <https://envirem.github.io/> (accessed 15.03.23).

26. GBIF. *Global Biodiversity Information Facility*, 2023. Available at: <https://www.gbif.org/> (accessed 5.04.23).

27. Gokturk A., Tıraş H. Stand Structure and Spatial Distribution of Trees at Different Developmental Stages and Stand Layers in Mixed Stands in Artvin Region, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, vol. 18(5), pp. 6163–6179. [https://doi.org/10.15666/aeer/1805\\_61636179](https://doi.org/10.15666/aeer/1805_61636179)

28. Hijmans R.J., Phillips S.J., Leathwick J., Elith J. *Dismo: Species Distribution Modeling*: R Package Version 1.3-3, 2017. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=dismo> (accessed 5.04.23).

29. Komarova A. Mapping of Caucasian Fir Forests (*Abies nordmanniana* (Stev.) Spach). *Proceedings of the 12 International SCGIS Conference*. USA, California, Monterey, 2013. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1761.8004>

30. Păltineanu Cr., Mihălescu I.F., Seceleanu I., Dragotă C.S., Vasenciuc F. *Ariditatea, Seceta, Evapotranspirația și Cerințele de Apă Ale Culturilor Agricole în România*. Constanța, Editura Ovidius University Press, 2007. 319 p. (In Rom.).

31. Pearson R.G., Dawson T.P., Liu C. Modelling Species Distributions in Britain: a Hierarchical Integration of Climate and Land-Cover Data. *Ecography*, 2004, vol. 27(3), pp. 285–298. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03740.x>

32. Peterson A.T. Uses and Requirements of Ecological Niche Models and Related Distributional Models. *Biodiversity Informatics*, 2006, vol. 3, pp. 59–72. <https://doi.org/10.17161/bi.v3i0.29>

33. Peterson A.T., Soberón J. Species Distribution Modeling and Ecological Niche Modeling: Getting the Concepts Right. *Natureza & Conservação*, 2012, vol. 10(2), pp. 102–107. <https://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>

34. Phillips S.J., Dudík M. Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extensions and a Comprehensive Evaluation. *Ecography*, 2008, vol. 31, iss. 2, pp. 161–175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>

35. Pshergusov R., Tembotova F., Chadaeva V., Sablirova Y., Mollaeva M., Akhomgotov A. Ecological Niche Modeling of the Main Forest-Forming Species in the Caucasus. *Forest Ecosystems*, 2022, vol. 9, art. no. 100019. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100019>

36. Riley Sh.J., DeGloria S.D., Elliot R. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity. *International Journal of Sciences*, 1999, vol. 5, no. 1–4, pp. 23–27.

37. Shevchenko N.E., Geraskina A.P. Northwest Caucasus Forest Spreading Evaluation by GIS Modeling and Historical and Geographic Data Analysis. *Ecological Questions*, 2019, vol. 30, no. 2, pp. 47–55. <https://doi.org/10.12775/EQ.2019.011>

38. Sillero N., Barbosa A.M. Common Mistakes in Ecological Niche Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, vol. 35, iss. 2, pp. 213–226. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1798968>

39. *SRTM 90m DEM Digital Elevation Database*, 2022. Available at: <https://srtm.csi.cgiar.org/> (accessed 10.04.23).

40. Title P.O., Bemmels J.B. ENVIREM: An Expanded Set of Bioclimatic and Topographic Variables Increases Flexibility and Improves Performance of Ecological Niche Modeling. *Ecography*, 2018, vol. 41, iss. 2, pp. 291–307. <https://doi.org/10.1101/075200>

41. Usta A., Yılmaz M. Relationships Between Environmental Variables and the Distributions of Tree Species on the Karadağ Mass in Transition Zone of Sites, NE Turkey. *Eurasian Journal of Forest Science*, 2020, vol. 8, pp. 11–24.

<https://doi.org/10.31195/ejejfs.583261>

42. *WorldClim2. WorldClim Climate Database*, 2023. Available at: <https://worldclim.com/version2> (accessed 10.04.23).

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

Научная статья

УДК 582.475.4\*574.47:630\*182(571.63)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-112-127

## Эколого-ценотическая структура реликтовой рощи сосны погребальной (*Pinus × funebris* Kom.) в Приморском крае

Т.А. Москалюк<sup>✉</sup>, д-р биол. наук; ResearcherID: [HSH-1295-2023](https://orcid.org/0000-0002-2546-2311),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2546-2311>

Е.Н. Репин, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [HSG-4662-2023](https://orcid.org/0000-0003-0993-4881),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0993-4881>

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, просп. 100-летия Владивостоку, д. 159, г. Владивосток, Россия, 690022; [tat.moskaluk@mail.ru](mailto:tat.moskaluk@mail.ru)<sup>✉</sup>, [revnik59@yandex.ru](mailto:revnik59@yandex.ru)

Поступила в редакцию 05.04.23 / Одобрена после рецензирования 02.07.23 / Принята к печати 04.07.23

**Аннотация.** Описано состояние и эколого-ценотическая (парцеллярная) структура рощи, сформированной сосной погребальной, или могильной (*Pinus × funebris* Kom.), в Приморском крае (Уссурийский район). Такие рощи – остаточные фрагменты реликтовой сосновой формации уникальной не только для края, но и для России. Они приурочены к сухим склонам южных экспозиций, подверженных более частым лесным пожарам, чем другие экотопы. Это создает реальную угрозу полного исчезновения реликтовых сосняков. Проблема сохранения формации согласуется с необходимостью изучения пространственной (парцеллярной) структуры и мониторинга состояния сосновых ценозов. На склоне в роще заложена пробная площадь, на которой детально описаны и закартированы в масштабе 1:100 все ярусы растительного покрова, с последующим попарным сравнением картосхем и выделением парцелл (в трактовке Н.В. Дылиса). Детальные наблюдения за рощей ведутся с 1992 г. Экстремальные условия произрастания обусловили низкий уровень видового богатства всех сообществ на изученном и соседних склонах. Состав видов нижних ярусов в сосновой роще и дубняке, сменившем сосняк, одинаков и представлен ксерофитной флорой. В подлеске обоих типов леса присутствуют 2 вида, в травяном ярусе – 19. В 2003 г. в роще было выделено 5 парцелл: 3 с доминированием сосны (сосновая осоковая, сосновая редкопокровная, сосновая с дубом разнотравно-осоковая) и 2 с доминированием дуба (дубовая с сосной (ксерофитная) и дубовая марьянниково-осоковая). Основа рощи – сосновая осоковая парцелла с материнским древостоем. В ней начался распад древостоя, хотя он еще не достиг перестойного возраста. К 2019 г. осталось 4 парцеллы: из-за перехода подроста сосны в категорию древостоя площадь сосновой редкопокровной парцеллы распределилась между смежными парцеллами. Наличие в «дубовых» парцеллах деревьев или подроста сосны хорошего жизненного состояния позволяет предположить смену в этих парцеллах дуба сосной в обозримом будущем, при условии отсутствия пожаров.

**Ключевые слова:** *Pinus × funebris*, *Quercus mongolica*, сосновая роща, деградация сосняков, парцелла, экологический мониторинг, Приморский край

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012200183-8).

**Для цитирования:** Москалюк Т.А., Репин Е.Н. Эколого-ценотическая структура реликтовой рощи сосны погребальной (*Pinus × funebris* Kom.) в Приморском крае // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 112–127. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-112-127>

Original article

## Ecological-Cenotic Structure of the Relict Japanese Pine (*Pinus × funebris* Kom.) Grove in the Primorski Territory

**Tatiana A. Moskaliuk**<sup>✉</sup>, Doctor of Biology; ResearcherID: [HSH-1295-2023](https://orcid.org/0000-0002-2546-2311),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2546-2311>

**Evgeniy N. Repin**, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [HSG-4662-2023](https://orcid.org/0000-0003-0993-4881),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0993-4881>

Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690022, Russian Federation; [tat.moskaluk@mail.ru](mailto:tat.moskaluk@mail.ru)<sup>✉</sup>, [revnik59@yandex.ru](mailto:revnik59@yandex.ru)

---

Received on April 5, 2023 / Approved after reviewing on July 2, 2023 / Accepted on July 4, 2023

---

**Abstract.** The condition and ecological-cenotic (parcel) structure of a grove formed by the Japanese pine (*Pinus × funebris* Kom.) in the Primorski Territory (Ussuri District) are described. Such groves are the residual fragments of a relict pine formation unique not only for the Region, but also for Russia. They are confined to the dry slopes with southern exposures, which are subject to more frequent forest fires than other ecotopes. This creates a real threat of complete extinction of the relict pine forests. The problem of preserving the formation is consistent with the need to study the spatial (parcel) structure and monitor the state of pine cenoses. A sample plot has been laid out on the slope in the grove, where all the layers of vegetation cover have been described in detail and mapped at a scale of 1:100, followed by a pairwise comparison of schematic maps and allocation of parcels (as interpreted by N.V. Dylis). Detailed observations of the grove have been conducted since 1992. Extreme growing conditions have resulted in a low level of species richness of all communities on the studied and adjacent slopes. The composition of species in the lower layers of the pine grove and the oak forest that has replaced the pine one is the same and is represented by xerophytic flora. There are 2 species growing in the undergrowth of both forest types and 19 in the herbaceous layer. In 2003, 5 parcels have been identified in the grove: 3 with pine dominance (pine sedge one, pine sparsely-covered one, pine with oak forb-sedge one) and 2 with oak dominance (oak with pine (xerophytic) one and oak cow wheat-sedge one). The basis of the grove is a pine sedge parcel with the parent tree stand. The stand began to disintegrate in it, although it has not yet reached a mature age. By 2019, there have remained 4 parcels: due to the transition of pine undergrowth to the stand category, the area of the pine sparsely-covered parcel has distributed between adjacent parcels. The presence of trees of pine undergrowth in good vital condition in the “oak” parcels of trees or pine undergrowth allows us to assume a replacement of oak with pine in these parcels in the foreseeable future, provided there are no fires.

**Keywords:** *Pinus × funebris*, *Quercus mongolica*, pine grove, degradation of pine forests, parcel, ecological monitoring, the Primorski Territory

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. 124012200183-8).

**For citation:** Moskaliuk T.A., Repin E.N. Ecological-Cenotic Structure of the Relict Japanese Pine (*Pinus × funebris* Kom.) Grove in the Primorski Territory. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 112–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-112-127>

*Введение*

Леса Приморского края включены Всемирным фондом дикой природы в список особо ценных природных объектов планеты. Насыщенные реликтовыми и эндемичными видами, они не в состоянии противостоять антропогенному прессу. В соответствии с главной стратегией Конвенции о биологическом разнообразии [29] исключительно большое значение имеют сохранение и восстановление видового и экосистемного биоразнообразия таких лесов как основы создания благоприятной среды обитания человека. В первую очередь это относится к сосновой формации.

В начале освоения края в XIX в. сосняки были одной из главных формаций. Капитан корпуса лесничих лесного ведомства А.Ф. Будищев [2] отмечал, что сосновые леса в Приморье превосходят по высоте лиственные и занимают настолько обширные площади, что свести данные древостои невозможно. В 1-й половине прошлого века сосняки произрастали на площади до 300 тыс. га [10, 25], но в результате хозяйственной деятельности и связанных с ней пожаров они почти повсеместно исчезли. На склонах южных экспозиций сосновые леса сменились дубняками из *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb., на равнинах были уничтожены полностью. В настоящее время сосновая формация в Приморском крае самая маленькая – занимает всего 3,9 тыс. га, что составляет не более 0,04 % от лесопокрытой площади субрегиона [16].

Главные лесобразующие виды формации: сосна густоцветковая (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc.) и сосна могильная, или погребальная (*P. × funebris* Kom.), – полиморфный гибрид *P. sylvestris* L. и *P. densiflora* [1]. Оба вида представляют неморальную флору и относятся к экологическому типу реликтов южно-маньчжурских ксерофитов [22]. Они близки как по биологическим, так и по экологическим свойствам: исключительно светолюбивы, нетребовательны к плодородию и влажности почв, холодостойки и, как следствие, занимают сходные местообитания – сухие инсолируемые склоны южных экспозиций. На границе соприкосновения ареалов эти сосны визуально трудно различить. Принимая во внимание результаты изучения сосен Приморья В.М. Урусовым [20–22], биоморфологических [14, 17] и кариологических [7, 8] исследований, считаем, что на территории края в основном произрастает *P. × funebris* Kom.

В отрогах Восточно-Маньчжурских гор и гор Пржевальского (Южный Сихотэ-Алинь) сосняки представлены небольшими рощами и одиночными деревьями с расстоянием между ними в несколько десятков километров. Оба вида сосны в 80-е гг. прошлого века были отнесены к исчезающим [24]. Во избежание полной потери ее формации в Приморском крае необходимо выявить закономерности сукцессии в сосновых лесах, начав с учета всех группировок вида [22] и изучения их эколого-ценотической (парцеллярной) структуры. Анализ структуры фитоценоза как результата функционирования сообщества дает дифференцированную характеристику его организации и показывает значение каждого компонента в лесообразовательном процессе [5, 7, 26, 28, 30, 32]. Мониторинговые исследования в сосновых рощах позволяют ответить на многие вопросы, касающиеся сохранения и восстановления биоразнообразия сосняков.

Цель нашей работы – изучить эколого-ценотическую (парцеллярную) структуру типичной для Южного Приморья реликтовой сосновой рощи с учетом трансформации ее фитоценоза за 16 лет.

*Объекты и методы исследования*

Район исследования находится в юго-западной части Уссурийского административного района на склонах западных отрогов гор Пржевальского. По ботанико-географическому районированию Б.П. Колесникова [9] эта территория относится к южной подзоне смешанных хвойно-широколиственных лесов южной фации кедровников с пихтой цельнолистной бассейнов рек, впадающих в залив Петра Великого. Д.И. Назимова [13] включила ее в зону смешанных широколиственно-хвойных лесов с дубом дальневосточного муссонно-континентального сектора. В данном районе в смежных бассейнах безымянных ручьев, впадающих в р. Ивнячка (правобережный приток р. Комаровка), располагаются лесные угодья Горнотаежной станции им. В.Л. Комарова.

Природные условия района исследования репрезентативны для всего южного Приморья. Они определяются преобладанием горного рельефа при относительно небольшой высоте над уровнем моря (максимальные отметки не более 700 м) и влиянием теплого течения Куроисио. Климат муссонно-континентальный с морозной сухой зимой (температуры января – от  $-25$  до  $-40$  °С) и теплым влажным летом (температуры июля – от  $+20$  °С) [4]. Среднегодовая сумма температур за период с температурами воздуха выше  $+5$  °С составляет около 3000 °С; среднегодовое количество осадков – 650–700 мм·год<sup>-1</sup>. Особенностью климата следует назвать весенние и позднеосенние засухи, сопровождающиеся обширными лесными пожарами, особенно разрушительными на крутых южных склонах.

Зональные почвы – бурые лесные. Им присущи слабокислая реакция, высокая степень насыщенности основаниями и интенсивная минерализация растительных остатков – до 70 % годовичного опада; мощность подстилки равняется 1–3 см. В зависимости от экспозиционной приуроченности свойства почвы сильно варьируют, что проявляется в продуктивности лесных сообществ. Запасы древостоев в чернопихтово-широколиственных лесах в нижних и средних частях северных склонов (бурые горно-лесные почвы на слабоскелетных суглинках) достигают 1000 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup> [3], а во вторичных лесах южных склонов (грубоскелетные каменистые бурые горно-лесные почвы) не превышают 100 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup> [10].

Зональные типы леса – смешанные хвойно-широколиственные с высоким разнообразием теплолюбивых реликтовых видов. На большей территории края коренные леса сменились вторичными разной степени нарушенности.

Объект исследования – единственная в лесах Горнотаежной станции сосновая роща. Она произрастает на южном склоне примерно в 8 км к северо-востоку от пос. Горнотаежное (координаты северо-восточного угла –  $43^{\circ}42'$  с. ш. и  $132^{\circ}11'$  в. д.; абсолютная высота – 195 м над ур. м.). Расстояние от водораздельной линии до подножия склона – 120–130 м. Покатость водораздела составляет 3–5°. В верхней части уклон варьирует от  $15^{\circ}$  до  $25$ – $27^{\circ}$ , на отдельных участках – до  $50^{\circ}$ .

Соседние склоны южной экспозиции заняты вторичными сухими дубняками: осоковыми – на водоразделах, и марьянниково-осоковым – в верхней части склонов. Дубняки восстановились на месте, где ранее произрастали сосняки, что подтверждается идентичностью рельефа местообитаний и полным сходством видов-спутников дуба и сосны [15]. Почва, и в сосняках, и в дубняках, характеризуется как дресвяно-щебнистая, гумусовый горизонт отсутствует или маломощный. Класс бонитета – V.

Роща представлена чистой куртиной сосны, занимающей участок водораздела и приводораздельной полосы с крутым уклоном, небольшими сосновыми группами и отдельными деревьями сосны, растущими в смежном дубняке. С северной стороны куртина примыкает к чистому дубняку марьянниково-осоковому с подлеском из леспедецы (*Lespedeza bicolor* Turcz.). Протяженность сосновой рощи с востока на запад – 60 м, с севера на юг – от 20 до 40 м. Площадь – 0,15 га, в последние 30 лет это значение не изменилось. В 1992 г. было выполнено глазомерное описание и определен возраст древостоя рощи.

Для ценопопуляции сосны характерен большой разброс диаметров стволов – от 6 до 40 см, обусловленный как разницей в возрасте, так и неблагоприятными условиями произрастания. Большинство сосен, растущих ниже водораздельной полосы, моложе по сравнению с древостоем куртины.

Возобновление на склоне неудовлетворительное, за исключением «окна» с юго-западной стороны куртины сосны, образовавшегося в результате вывала одного из опушечных деревьев. Подлесок редкий, распределен неравномерно, в основном в средней и нижней частях склона. Он образован единичными группировками рододендрона (*Rhododendron mucronulatum* Turcz.) высотой 0,7–1,0 м и одиночными полусухими особями леспедецы. Травяной ярус разрежен, в нем растут ксерофитные виды осок и разнотравья. В куртине сосны обычны осоки низенькая (*Carex nanella* Ohvi) и Харкевича (*C. charkeviczii* А.Е. Kozhevnikov), в дубняке и среди молодых сосен – осока низенькая, марьяник розовый (*Melampyrum roseum* Maxim.), овсяница овечья (*Festuca ovina* L.), смолевка корейская (*Silene koreana* Kom.), полыни лохматая (*Artemisia pannosa* Krasch.) и побегоносная (*A. stolonifera* (Maxim.) Kom.) и др.

Исследование проводилось на постоянных пробных площадях (ППП), заложенных на смежных склонах в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки». Размер ППП с сосновой рощей 40 × 70 м. Она заложена в 2003 г. В нее вошли все окружающие рощу ценоэлементы (парцеллы) сообщества, включая фрагменты дубняка с деревьями сосны. В год закладки детально описаны местоположение и экологические условия рощи, выявлен ее полный флористический состав. В 2019 г. ППП была переописана.

Таксационно-лесоводственное и геоботаническое описания выполнены согласно методическим указаниям В.Н. Сукачева [19] и А.И. Уткина [23]. Диаметры деревьев измерялись мерной вилкой, иногда штангенциркулем, на высоте 1,3 м от основания ствола с точностью до 0,1 см. Высоты определялись клинометром Suunto РМ-5 с точностью до 0,1 м. У вываленных деревьев фиксировались диаметр, высота и длина боковых приростов побегов (концы скелетных ветвей). Полученные данные обработаны стандартными методами вариационной статистики с применением программы Microsoft Excel. При перечете древостоя отмечались жизненное состояние и особенности каждого дерева (обдиры коры, морозобоины и др.). Таксационные показатели рассчитывались по региональным нормативам [18] с последующим пересчетом на 1 га. Описание подроста проводилось на 3 площадках величиной от 9 до 16 м<sup>2</sup>. У молодых деревьев определялись возраст и жизненное состояние, устанавливалась высота, прирост верхушечного побега за последний год.

Большое внимание уделялось травяному ярусу, чутко реагирующему на смену внутривидовых условий. Фиксировались видовой состав, габитус, обилие по шкале Друде и проективное покрытие трав.

В качестве главного ценоэлемента выбрана парцелла – элементарная и неделимая единица горизонтального расчленения биогеоценоза. По определению Н.В. Дылиса [6], парцеллы должны быть однородными по видовому составу, приуроченности к экотопам, специфике взаимосвязей и материально-энергетического обмена между компонентами. Для выделения парцелл применялся метод картирования всех ярусов фитоценоза в масштабе 1 : 100 с последующим наложением картосхем и сравнительным анализом ярусов с учетом условий обитания. Одновременно с картированием и детальным описанием растительного покрова парцелл характеризовался микрорельеф.

### Результаты исследования и их обсуждение

В растительном покрове на склоне с сосновой рощей в 2003 г. четко выделялись 5 парцелл, в т. ч. 3 с господством сосны: сосновая осоковая, сосновая редкопокровная, сосновая с дубом разнотравно-осоковая, и 2 с преобладанием дуба – дубовая марьянниково-осоковая и дубовая с сосной (ксерофитная) [12]. К 2019 г. их число сократилось до 4. Все сосновые парцеллы располагались рядом друг с другом (рис. 1), занимая водораздел и спускаясь вниз по склону до высоты 40 м над ур. м.

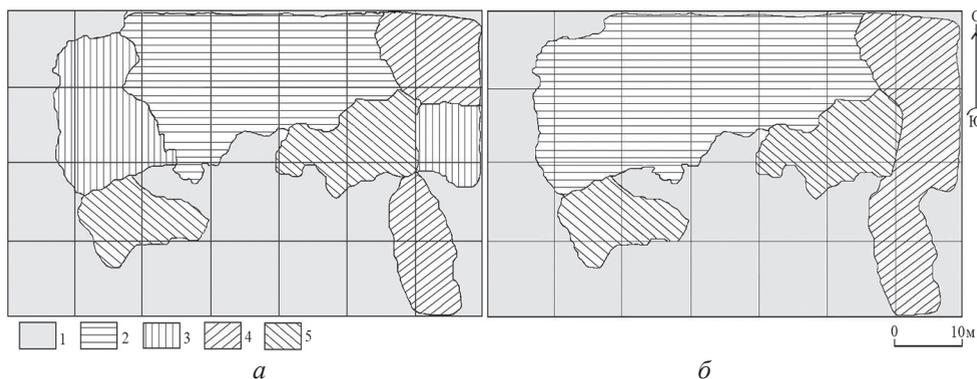


Рис. 1. Парцеллярная структура сосновой рощи с разницей в 16 лет: *а* – 2003 г.; *б* – 2019 г. (1 – дубовая марьянниково-осоковая парцелла (Д мрн-ос); 2 – сосновая осоковая (С ос); 3 – сосновая редкопокровная (С рп); 4 – сосновая с дубом разнотравно-осоковая (С с Д рт-ос); 5 – дубовая с сосной ксерофитная (Д с С ксер))

Fig. 1. The parcel structure of a pine grove with a difference of 16 years: *a* – 2003; *b* – 2019 (Parcels: 1 – oak cow wheat-sedge parcel; 2 – pine sedge; 3 – pine sparsely-covered; 4 – pine with oak forb-sedge, 5 – oak with pine xerophytic)

В 1992 г. на склоне насчитывалось 73 взрослых сосны. К 2019 г. 14 из них выпало, 20 сосен перешло из подроста в категорию древостоя.

Самая большая из сосновых парцелл – сосновая осоковая на плоской вершине водораздела и узкой приводораздельной полосе. При этом к 2019 г. она еще увеличилась в 1,4 раза по сравнению с учетом 2003 г. (табл. 1).

Основу парцеллы составляет куртина сосны. Величина и контуры куртины за 16 лет не изменились. Размещение древостоя равномерное, сомкнутость крон за период наблюдений была близка к 1,0. Для деревьев типичны суковатые широкие кроны с 2–3 плоскими вершинами. Нижние скелетные ветви у многих крон начинаются с 1,0–1,5 м от основания ствола.

Таблица 1

**Площади парцелл в 2003 и 2019 гг., %**  
**The parcel areas in 2003 and 2019, %**

Объект	Площадь, м <sup>2</sup>	Год	Парцелла*				
			Д мрн-ос	С ос	С рп	С с Д рт-ос	Д с С ксер
ППП	2800	2003	45,5	21,0	12,1	10,4	10,9
		2019	45,2	29,9	–	13,6	11,3
Сосновая роща	1535	2003	–	38,5	22,3	19,2	20,1
		2019	–	54,5	–	24,8	20,7

\* Условные обозначения – см. рис. 1.

В 1992 г. возраст деревьев в куртине варьировал от 44 до 68 лет, диаметры стволов – от 16 до 38 см. 19 более молодых (16–26 лет) тонкомерных деревьев с диаметрами стволов 7–12 см росли по опушке куртины и за ее пределами.

В 2003 г. большинство деревьев выглядели здоровыми (рис. 2), но многие уже имели признаки, свидетельствующие о неблагополучном состоянии древостоя: пожарные подсушины, летные отверстия стволовых вредителей в нижней части стволов, выдолбы дятлов. У крупных деревьев встречались лубодерены диких кабанов.

К 2019 г. в куртине незначительно увеличились размеры деревьев и на 15 % снизился запас. В процессе самоизреживания и воздействия неблагоприятных факторов число деревьев сократилось на 32,1 % (табл. 2).

Таблица 2

**Таксационные показатели куртины**  
**The inventory parameters of the clump**

Год	Возраст, лет	Число деревьев, шт. га <sup>-1</sup>		Средние с ошибкой для растущих деревьев		Сумма площадей сечения стволов, м <sup>2</sup>	Запас древесины, м <sup>3</sup>	Сомкнутость крон
		растущих	сухих	диаметр, см	высота, м			
1992 [17]	56	53	0	24,0±1,02	10,5±0,92	2,612	19,6	1,0
2019	78	36	9	26,9±1,23	11,4±1,43	2,056	16,5	0,8

В настоящее время в куртине преобладают фаузные деревья с сухими скелетными ветвями в разреженных кронах (рис. 3). Живые ветви сосредоточены в верхней части крон и вдоль освещенной стороны ствола. Ежегодный прирост боковых побегов составляет всего 5–7 (10) см, при среднем значении 6,57±0,65 см.

Возобновление в описываемой парцелле неудовлетворительное, за исключением окон, образовавшихся на месте выпавших деревьев. В окнах единичны особи подроста сосны высотой до 0,4 м и самосев (2–3 экз. · м<sup>-2</sup>). По краю парцеллы встречается чахлый самосев дуба и одиночные деревца осины высотой до 2 м.

Ярус подлеска не выражен. Из кустарников единичны полусухие экземпляры леспедецы и рододендрона высотой 0,7–1,0 м. Травяной ярус фрагментарный (проективное покрытие – не более 50 %). Его образуют немногочисленные ксерофитные виды: осоки низенькая и Харкевича, веретенник (*Atractylodes ovata* (Thunb.) DC), китагавия (*Kitagawia terebinthacea* (Fisch. ex Spreng.) M. Pimen.), полынь лохматая, смолевка. Ближе к краю парцеллы появляется марьянник. Фон образуют осоковая и осоковая редкопокровная микрогруппировки перемежающиеся с мертвопокровными участками.



Рис. 2. Парцелла сосновая  
осоковая в 2003 г.

Fig. 2. The pine sedge parcel  
in 2003



Рис. 3. Парцелла сосновая  
осоковая в 2019 г.

Fig. 3. The pine sedge parcel  
in 2019

Сосновая редкопокровная парцелла выделена в 2003 г. За 10 лет до этого она уже занимала 2 участка с крупномерным подростом. Деревца в количестве 1200–1600 экз.·га<sup>-1</sup> росли на расстоянии 1–2 м друг от друга. Большой фрагмент парцеллы, величиной около 250 м<sup>2</sup>, располагался на 20–25 м ниже водораздела, примыкая к куртине сосны с запада. Меньший фрагмент (91 м<sup>2</sup>) вклинивался между сосновой с дубом разнотравно-осоковой и дубовой с сосной ксерофитной парцеллами с восточной стороны от куртины (см. рис 1, а). На нем среди подроста встречались единичные тонкомерные деревья сосны и дуба.

Высота самых крупных экземпляров в парцелле в 2003 г. достигала 3,5 м, средний текущий прирост по высоте – 30–40 см, диаметр не превышал 5 см. После смыкания крон в парцелле началось самоизреживание; усохли почти все нижние ветви. В середине минувшего десятилетия значительная часть подроста была уничтожена пожаром. В 2003 г. в парцелле насчитывалось 39 сосен.

В связи с переходом молодого поколения сосны в категорию древостоя произошло слияние фрагментов этой парцеллы со смежными парцеллами, занимающими сходные экотопы и обладающими одинаковым составом и проективным покрытием видов-ксерофитов в нижних ярусах. Первый, большой фрагмент, вошел в сосновую осоковую парцеллу, второй – в сосновую с дубом разнотравно-осоковую. В категории подроста к 2019 г. осталось не более 1/2 от прежнего числа. Средние таксационные показатели молодого древостоя в этот год были еще ощутимо меньшими, чем в тех парцеллах, в которые они вошли (табл. 3), но по всем признакам в дальнейшем значения быстро сравняются. Подлесок в редкопокровной сосновой парцелле отсутствует. Фон на поверхности создает хвойный опад, по которому, как и в предыдущей парцелле, пучками рассеянно растут осоки, овсяница и ксерофитное разнотравье.

Таблица 3

Таксационные показатели древостоя сосны в парцеллах сосновой роши, 2019 г.  
The inventory parameters of the pine stand in pine grove parcels, 2019

Парцелла	Площадь		Возраст, лет	Число стволов, шт. га <sup>-1</sup>		Средние с ошибкой				Сумма площадей сечения стволов, м <sup>2</sup> га <sup>-1</sup>		Запас древесины, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>		Сомкнутость крон
	м <sup>2</sup>	%		растущих	сухих	диаметр ствола на высоте 1,3 м, см	высота растущих, м	растущих	сухих	растущих	сухих	растущих	сухих	
	Сосновая, куртина	588,6	38,3	79	612	153	26,9±1,12	19,8±1,25	11,4±0,93	35,0	4,7	280,3	34,3	0,9
Сосновая (ранее – сосновая редкостроенная)	248,4	16,2	56 (46÷79)	685	121	14,4±1,04	7,7±1,16	8,2±0,98	11,1	0,6	55,2	0,2	0,8	
Сосновая с дубом разнотравно-осоковая	380,4	24,8	56 (46÷79)	526	–	18,6±0,95	–	9,4±1,23	14,3	–	106,0	–	0,7	
Дубовая с сосной ксерофитная	317,7	20,7	46, ед. 106	189	–	18,5±0,67 (ед. 40)	–	8,3±1,06	5,1	–	38,7	–	0,5	
<i>Итого</i>	1535,1	100	79	514	78	22,1±1,32	17,6±1,49	10,3±1,32	19,8	1,9	150,3	13,2	0,8	

Сосновая с дубом разнотравно-осоковая парцелла в 2003 г., как и осоковая редкостроенная, располагалась на 2 участках. Один из фрагментов, более крупный, примыкал с востока к сосновой осоковой парцелле. Другой спускался по склону ниже восточного фрагмента сосновой редкостроенной парцеллы. К 2019 г. за счет слияния с последней парцеллой разнотравно-осоковая, как и сосновая осоковая, стала неделимой, занимая полосу до 40 м (см. рис. 1).

Основа парцеллы – такие же крупные деревья, как в сосновой куртине, но сомкнутость крон изначально меньше. При этом характерно наличие деревьев как более молодых по сравнению с куртиной, так и старых с распростертыми нижними ветвями. Большинство деревьев испытывают угнетение, но сухостоя нет. У нескольких сосен на водоразделе снегом сломаны вершины, что стало причиной образования у деревьев 2–3 вершин. Для некоторых деревьев обычны кабаны лубодернины и искривления нижней части стволов. Под самым толстым нижним деревом в 2019 г. обнаружено блюдцеобразное углубление с выходами на поверхность шнуровидных корней – лежка кабана или другого зверя.

У дуба, растущего в примеси к сосне, преобладают деревья с корявыми стволами и обильной корневой порослью. Кроны у них разреженные, с частыми сменами вершин, нередко с усохшими скелетными ветвями, но сухих деревьев нет. Средний диаметр дуба в 1992 г.

был равен  $7,2 \pm 1,6$  см, в 2019 г. –  $10,7 \pm 0,61$  см, средняя высота –  $5,1 \pm 0,62$  и  $6,8 \pm 0,86$  м соответственно. В нижней части парцеллы толщина стволов достигала 16 и 18 см соответственно (поросль дуба).

Возобновление представлено в основном самосевом и всходами сосны и порослью дуба. Оно обильнее, чем в других парцеллах, потому что освещение подпологового пространства в этой парцелле лучше. В ней уже можно выделить ярус подлеска, в котором растут леспедеца и рододендрон.

Более высокой сомкнутостью – 0,2–0,3, отличаются кустарники в нижней части парцеллы. Рододендрон здесь образует небольшие компактные куртинки. Травяной ярус более развит, чем в остальных «сосновых» парцеллах. Общее проективное покрытие трав составляет в среднем 60–70 %. Как и везде по склону, доминирует осока низенькая; обычны осоки Харкевича и длинноклювая (*Carex longirostrata* С.А. Мей.), марьянник. В данной парцелле выявлено самое высокое разнообразие видового состава трав: аяния Палласа (*Ajania pallasiana* (Fisch. ex Bess) Poljak.), веретенник, гвоздика китайская (*Dianthus chinensis* L.), ирис одноцветковый (*Iris uniflora* Pall. ex Link), китайавия, лапчатка земляниковидная (*Potentilla fragarioides* L.), полынь побегоносная и смолевка корейская.

Дубовая с сосной ксерофитная парцелла располагается двумя фрагментами на выпуклой поверхности с уклоном до  $45^\circ$ . Зимой ветром с нее полностью сдувается снег, в другие сезоны скатывается вниз вся опавшая органика. Для парцеллы типичны минерализованные участки. Такие условия среды обитания относятся к экстремальным и обычны для южных склонов. Особенность парцеллы – крупные единичные сосны (рис. 4). Они значительно старше остальных деревьев рощи, и у них от основания простираются толстые ветви-стволы, направленные строго к свету. Формирование таких ветвей наблюдается у сосны и в культуре (рис. 5), что позволяет считать этот признак эволюционно закрепленным для вида.



Рис. 4. Одиночно стоящая сосна в дубовой с сосной ксерофитной парцелле

Fig. 4. A solitary pine tree in an oak with pine xerophytic parcel



Рис. 5. Аллея могильной сосны в дендрарии Горнотаежной станции

Fig. 5. The Japanese pine alley in the arboretum of the Mountain Taiga Station

Деревья в парцелле растут лишь по границе. Сосны по жизненности превосходят деревья дуба, растущие рядом. У первых прямые стволы, густая ярко-зеленая хвоя, выше прирост побегов; они отличаются хорошим плодоношением. Для дуба характерны тонкомерные и кривые стволы, обилие усохших ветвей в кронах, густая прикорневая поросль.

Подрост в «ксерофитной» парцелле отсутствует. В подлеске единичны особи леспедецы и рододендрона с многочисленными торчками отмерших побегов. Травяной ярус дискретный, проективное покрытие не превышает 5 %. В нем преобладают осоки. Все травы растут небольшими пучками (гвоздика, китагавия, веретенник, ирис и др.) или образуют розетки (смолевка, полынь лохматая). Точно такой же облик у ксерофитных парцелл в сухих дубняках.

Дубовая марьянниково-осоковая парцелла – основная парцелла одноименного дубняка, окружающего сосновую рощу и занимающего склоны с высокоинсолируемыми экотопами [11]. Древоостой в этой парцелле более разрежен по сравнению с древоостоем на водоразделе и в сосновых парцеллах. Преобладают кривоствольные деревья высотой не более 7 м с 2–3 стволами (рис. 6). Кроны раскидистые, часто «разорванные», с множеством сухих сучьев. Обычны также небольшие деревья – до 4 м, с плоскими ажурными кронами и «юбками» из поросли. Одни из них – старые, сильно угнетенные, растут обычно рядом с большими деревьями или на выходах мелкозема; другие – гораздо моложе. Сухостой в парцелле единичен. Преобладающий возраст дуба на склоне – 79 лет. Это доказывает, что сосновая роща и дубняк восстановились после пожара в одно время.

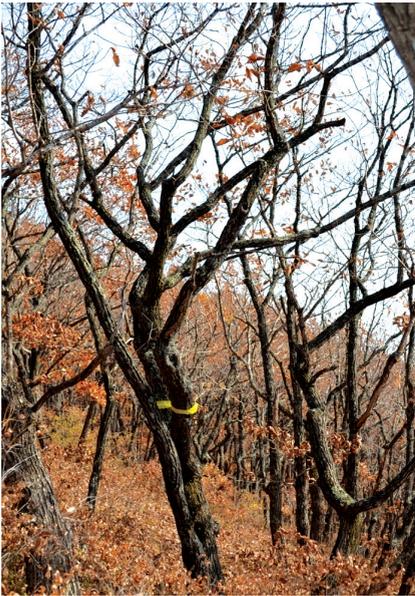


Рис. 6. Дубовая марьянниково-осоковая парцелла

Fig. 6. The oak cow wheat-sedge parcel

Подрост дуба представлен корневыми отпрысками высотой не более 0,6 м и единичным самосевом 5–7 лет. Для парцеллы свойственны одиночные деревца сосны разной высоты, но не более 1,7 м. Некоторые из них уже имеют нижние ветви, направленные на юг и равные по величине главному стволу.

Из кустарников, как и везде по склону, растут рододендрон остроконечный и леспедеца двуцветная. Оба вида сильно угнетены, но с переходом вниз по склону у них повышается облиственность и увеличивается прирост побегов, рододендрон образует группировки. Травяной ярус разрежен – проективное покрытие составляет 50 %. В нем доминируют те же виды, что и в сосновой с дубом разнотравно-осоковой парцелле: осока низенькая и марьянник розовый; обычные осоки Харкевича и длинноклювая, овсяница овечья. Отдельными особями и небольшими куртинками растут полыни, смолевка, веретенник, ирис, гвоздика и др.

Интересно, что в Северо-Восточном Китае и Корее смена сосновых лесов дубняками связана не только с лесными пожарами, но и с внедрением дуба в ненарушенные сосняки. При наличии густого подлеска этот процесс усиливается после того, как дубовый подрост поднимется над кустарниками [27], но возобновлению дуба препятствуют высокая густота подлеска и мощная лесная подстилка под материнскими деревьями [31]. В подлеске двух названных стран растут те же виды, что и в сосняках и дубняках Приморья: леспедеца двуцветная и рододендрон остроконечный.

### Заключение

В Приморском крае к концу XX в. от некогда сплошных массивов господствующей сосновой формации остались разрозненные рощи и отдельные куртины сосны в окружении вторичных низкобонитетных дубняков на склонах южных экспозиций. Сообщества сосны могильной и сменившие их на южных склонах гор древостои дуба монгольского характеризуются одинаковым составом ксеро-морфной флоры в нижних ярусах. В подлеске произрастают 2 вида: леспедеца и рододендрон, в травяном ярусе – 19 видов, среди которых доминируют сухолюбивые осоки и марьянник; обычны овсяница, полыни лохматая и побегоносная и другие ксерофиты.

В результате исследований, выполненных с 1992 по 2019 гг. в лесных угодьях Горнотаежной станции, репрезентативных по условиям произрастания и характеристикам лесного покрова для южной части Приморского края, выявлено высокое сходство парцеллярной структуры рощи из *Pinus × funebris* Kom. с парцеллярной структурой дубняков, произрастающих в аналогичных условиях.

При острой периодической сухости и низком плодородии маломощных почв парцеллы, как сосняков, так и дубняков, строго приурочены к конкретным экотопам в пределах склона. Парцеллы одинаковых экотопов различаются в основном составом и состоянием древостоя.

В ценотической структуре рощи в 2003 г. было выделено 5 парцелл: 3 с доминированием сосны (сосновая осоковая, сосновая редкопокровная и сосновая с дубом разнотравно-осоковая) и 2 с доминированием дуба (дубовая марьянниково-осоковая и дубовая с сосной ксерофитная). Парцеллы с доминированием дуба («дубовые») включены в основную рощу из-за наличия в них молодых деревьев или подроста сосны, указывающих на возможность смены дуба сосной в фитоценозах в обозримом будущем.

Ядро сосновой рощи составляет чистая куртина материнского древостоя на водоразделе, выделенная в сосновую осоковую парцеллу с четким периметром и высокосомкнутым кроновым пологом. Несколько деревьев сосны в этом месте уцелели во время давнего пожара и, став источником обсеменения территории, способствовали образованию куртины, а затем и остальных парцелл рощи. С 1992 г. наблюдается медленный распад куртины, в то время как более молодое поколение сосны в сосновой редкопокровной и сосновой с дубом парцеллах отличается значительно лучшим, чем у дуба, жизненным состоянием.

К 2019 г. сосновая редкопокровная парцелла, представленная куртинами крупномерного подроста, в результате естественного самоизреживания и перехода подроста за 16 лет в категорию древостоя частично разделилась между сосновой осоковой и сосновой с дубом разнотравно-осоковой парцеллами.

Установлена характерная морфологическая особенность сосны – у многих деревьев в основании ствола в молодом возрасте начинает формироваться скелетная ветвь, по величине незначительно уступающая основному стволу. Она сильно наклонена к поверхности и вытянута по направлению к подножию склона.

Малые размеры, слабая возобновительная способность и регулярная повторяемость пожаров создают угрозу полного исчезновения сосняков в регионе и обуславливают необходимость учета оставшихся сосновых сообществ и наземного мониторинга ценогической структуры сосняков на ключевых участках с целью изучения лесообразовательного процесса и разработки технологии реинтродукции сосны в Южном Приморье.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. М.: Наука, 1978. 189 с.  
Bobrov E.G. *Forest-Forming Conifers of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1978. 189 p. (In Russ.).
2. Будищев А.Ф. Описание лесов южной части Приморской области: сб. главнейш. офиц. докум. по управл. Вост. Сиб. Т. 5. Вып. 1: Леса Приамурского края. 2-е изд. Хабаровск, 1898. 488 с.  
Budishchev A.F. *Description of Forests of the Southern Part of the Primorskaya Oblast: Collection of the Main Official Documents on Management of the Eastern Siberia*, vol. 5, iss.1: Forests of the Amur Region. 2nd ed. Khabarovsk, 1898. 488 p. (In Russ.).
3. Васильев Н.Г., Колесников Б.П. Чернопихтово-широколиственные леса южного Приморья. М.; Л.: АН СССР, 1962. 146 с.  
Vasil'ev N.G., Kolesnikov B.P. *Black Fir-Broadleaf Forests of Southern Primorye*. Moscow, Leningrad, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1962. 146 p. (In Russ.).
4. Витвицкий Г.Н. Климат // Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 70–96.  
Vitvitskij G.N. *Climate. Yuzhnaya chast' Dal'nego Vostoka*. Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 70–96. (In Russ.).
5. Галанин А.В. Ценогическая организация растительного покрова. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 163 с.  
Galanin A.V. *Coenotic Organization of Vegetation Cover*. Vladivostok, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 1989. 163 p. (In Russ.).
6. Дылис Н.В. Структура лесного биогеоценоза: докл. на XXI ежегодн. Комаровском чтении. М.: Наука, 1969. 55 с.  
Dylis N.V. *The Structure of Forest Biogeocenosis: Report at the 21st annual Komarovsky Reading*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 55 p. (In Russ.).
7. Дылис Н.В. Структурно-функциональная организация биогеоценологических систем и ее изучение // Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1974. С. 14–23.  
Dylis N.V. *Structural and Functional Organization of Biogeocenotic Systems and its Study. Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovanij*. Moscow, Nauka Publ., 1974, pp.14–23. (In Russ.).
8. Ильченко Т.П., Лауве Л.С., Урусов В.М. Изменчивость сосны погребальной в Приморье в связи с особенностями климата // Редкие и исчезающие древесные растения юга Дальнего Востока. Владивосток, 1978. С. 28–44.  
Il'chenko T.P., Lauve L.S., Urusov V.M. *Variability of the Japanese Pine in Primorye in Connection with Climate Features. Redkie i ischezayushchie drevesnye rasteniya yuga Dal'nego Vostoka*. Vladivostok, 1978, pp. 28–44. (In Russ.).

9. Колесников Б.П. Растительность // Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 206–250.

Kolesnikov B.P. Rastitel'nost'. *Yuzhnaya chast' Dal'nego Vostoka*. Moscow, Nauka Publ., 1969, pp. 206–250. (In Russ.).

10. Куренцова Г.Э. Растительность Приморского края. Владивосток: Дальневост. книжн. изд-во, 1968. 192 с.

Kurentsova G.E. *Vegetation of the Primorsky Territory*. Vladivostok, Far Eastern Book Publishing House, 1968. 192 p. (In Russ.).

11. Москалюк Т.А. Парцеллярная структура сухих дубняков на юге Приморья // Биологические исследования на Горнотаежной станции: юбилейн. сб. науч. тр. ГТС ДВО РАН. Владивосток: ДВО РАН, 2002. Вып. 8. С. 162–202.

Moskalyuk T.A. Parcel Structure of Dry Oak Forests in the South of Primorye. *Biological Research at the Mountain-Taiga Station: Jubilee Collection of Scientific Papers of the Mountain-Taiga Station of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. Vladivostok, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002, iss. 8, pp. 162–202. (In Russ.).

12. Москалюк Т.А., Репин Е.Н. О мониторинге естественной динамики лесов Южного Приморья на примере соснового и дубового сообществ // Мониторинг растительного покрова охраняемых территорий Российского Дальнего Востока: материалы рабоч. совещ. Владивосток: БСИ ДВО РАН, 2002. С. 156–163.

Moskalyuk T.A., Repin E.N. On Monitoring the Natural Dynamics of Forests in Southern Primorye Using Pine and Oak Communities as an Example. *Monitoring the Vegetation Cover of Protected Areas of the Russian Far East: Proceedings of the Working Session*. Vladivostok, Botanical Garden-Institute of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002, pp. 156–163. (In Russ.).

13. Назимова Д.И. Климатическая ординация лесных экосистем как основа их классификации // Лесоведение, 1995. № 4. С. 63–73.

Nazimova D.I. Climatic Ordination of Forest Ecosystems as a Basis for Their Classification. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1995, no. 4, pp. 63–73. (In Russ.).

14. Орлова Л.В. О сосне погребальной (*Pinus funebris* Kom., Pinaceae) // Turczaninowia. 1999. № 2(2). С. 41–45.

Orlova L.V. On the Japanese Pine (*Pinus funebris* Kom., Pinaceae). *Turczaninowia*, 1999, no. 2(2), pp. 41–45. (In Russ.).

15. Петровпавловский Б.С. Леса Приморского края: (Эколого-географический анализ). Владивосток: Дальнаука, 2004. 317 с.

Petrovpravlovskij B.S. *Forests of the Primorski Territory (Eco-Geographical Analysis)*. Vladivostok, Dal'nauka, 2004. 317 p. (In Russ.).

16. Распределение площади лесов и запасов древесины по преобладающим породам и группам возраста (01.01.2022) / Информация по форме открытых данных. Форма № 2-ГЛР // Информация о порядке предоставления сведений из гос. лесн. реестра Приморского края. Режим доступа: <https://primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/forestry/otkrytye-dannye-o-lesakh-i-lesnoy-promyshlennosti/index.php> (дата обращения: 17.11.22).

Distribution of Forest Area and Timber Stocks by Predominant Species and Age Groups as of 01.01.2021. *Information on the Open Data Form. Form no. 2-GLR. Information on the Procedure for Providing Information from the State Forest Register of the Primorski Territory*. (In Russ.).

17. Репин Е.Н. Сосна погребальная в лесных угодьях Горнотаежной станции ДВО РАН // Биологические исследования в естественных и культурных экосистемах Приморского края. Владивосток: Дальнаука, 1993. С. 82–91.

Repin E.N. The Japanese Pine in the Forest Lands of the Mountain Taiga Station of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. *Biological Research in Natural*

and Cultural Ecosystems of the Primorski Territory. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1993, pp. 82–91. (In Russ.).

18. Справочник для таксации лесов Дальнего Востока / отв. сост. В.Н. Корякин. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1990. 526 с.

*Handbook for Forest Inventory in the Far East*. Resp. comp. V.N. Koryakin. Khabarovsk, Far East Forestry Research Institute, 1990. 526 p. (In Russ.).

19. Сукачев В.Н. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. Т. 3. 543 с.

Sukachev V.N. *Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology*. Leningrad, Nauka Publ., 1972, vol. 3. 543 p. (In Russ.).

20. Урусов В.М. География хвойных Дальнего Востока (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН / Научный совет «Комплексные проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ДВО АН СССР»). Владивосток: Дальнаука, 1995. 251 с.

Urusov V.M. Geography of Conifers of the Far East (Pacific Institute of Geography, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences). *Scientific Council "Complex Problems of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources of the Far East Branch of the USSR Academy of Sciences"*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1995. 251 p. (In Russ.).

21. Урусов В.М. Сосны и сосняки Дальнего Востока. Владивосток: ВГУЭС, 1999. 386 с.

Urusov V.M. *Pines and Pine Forests of the Far East*. Vladivostok, Vladivostok State University of Economics and Service, 1999. 386 p. (In Russ.).

22. Урусов В.М., Варченко Л.И., Вриц Д.Л., Прокопенко С.В., Чипизубова М.Н., Петропавловский Б.С. Владивосток – юг Приморья: вековая и современная динамика растительности. Владивосток: Дальнаука, 2010. 420 с.

Urusov V.M., Varchenko L.I., Vrishch D.L., Prokopenko S.V., Chipizubova M.N., Petro-pavlovskij B.S. *Vladivostok – the South of Primorye: Secular and Modern Dynamics of Vegetation*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2010. 420 p. (In Russ.).

23. Уткин А.И. Методика исследований первичной продуктивности лесов // Биологическая продуктивность лесов Поволжья. М.: Наука, 1982. С. 59–71.

Utkin A.I. Methodology for Research of Primary Forest Productivity. *Biological Productivity of the Volga Region Forests*. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 59–71. (In Russ.).

24. Харкевич С.С., Качура Н.Н. Редкие виды растений Дальнего Востока и их охрана. М.: Наука, 1981. 234 с.

Kharkevich S.S., Kachura N.N. *Rare Plant Species of the Far East and Their Protection*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 234 p. (In Russ.).

25. Шушкин И.К. Сосна (*Pinus funebris* Kom.) на юге Уссурийского края // Вестн. ДВФ АН СССР. 1933. № 1–3. С. 29–42.

Shishkin I.K. Pine (*Pinus funebris* Kom.) in the South of the Ussuriland. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Akademii nauk SSSR*, 1933, no. 1–3, pp. 29–42. (In Russ.).

26. Chai Z., Sun C., Wang D., Liu W., Zhang C. Spatial Structure and Dynamics of Predominant Populations in a Virgin Old-Growth Oak Forest in the Qinling Mountains. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, vol. 32, iss. 1, pp. 19–29.

<http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2016.1183703>

27. Kato J., Hayashi I. Quantitative Analysis of a Stand of *Pinus densiflora* Undergoing Succession to *Quercus mongolica* ssp. *crispula*: II. Growth and Population Dynamics of *Q. mongolica* ssp. *crispula* under the *P. densiflora* Canopy. *Ecological Research*, 2006, vol. 22, iss. 3, pp. 527–533. <https://doi.org/10.1007/s11284-006-0046-4>

28. Kolobov A.N., Frisman E.Ya. Evaluate the Initial Spatial Structure and Heterogeneity of the Composition for Spruce and Larch Stands on Real Data Self-Thinning of Even-Aged Stands. *Ecological Complexity*, 2018, vol. 34, pp. 89–99.

<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2017.09.005>

29. Krejzar T. *UN Strategic Plan for Forests 2017–2030. Preparations of UNFF-12 Session*. Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/timber/meetings/20170329/5-UNFF\\_Strategic\\_Plan\\_on\\_forests\\_and\\_Preparations.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/timber/meetings/20170329/5-UNFF_Strategic_Plan_on_forests_and_Preparations.pdf) (accessed 26.06.2022).

30. Mestre L., Toro-Manríquez M., Soler R., Huertas-Herrera A., Martínez-Pastur G., Lencinas M.V. The Influence of Canopy-Layer Composition on Understory Plant Diversity in Southern Temperate Forests. *Forest Ecosystems*, 2017, vol. 4, iss. 6. 13 p.

<https://www.sci-hub.ru/10.1186/s40663-017-0093-z>

31. Song U. Forest Litter and Shrubs Act as an Understory Filter for the Survival of *Quercus mongolica* Seedlings in Mt. Kwan-ak, South Korea. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, art. no. 4193. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40624-4>

32. Spicer M.E., Mellor H., Carson W.P. Seeing beyond the Trees: a Comparison of Tropical and Temperate Plant Growth Forms and Their Vertical Distribution. *Ecology*, 2020, vol. 101, no. 4, art. no. e02974. <https://doi.org/10.1002/ecy.2974>

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



Научная статья

УДК 674.061

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-128-142

## Обоснование сырьевого обеспечения лесопромышленного предприятия

*А.В. Солдатов, канд. техн. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0684-8163>*

*Э.Ф. Герц<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>*

*А.В. Мехренцев, 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, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>*

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; soldatovav@m.usfeu.ru, gertsef@m.usfeu.ru<sup>✉</sup>, mehrentsevav@m.usfeu.ru, urazovaaf@m.usfeu.ru

---

*Поступила в редакцию 10.07.24 / Одобрена после рецензирования 15.10.24 / Принята к печати 19.10.24*

---

**Аннотация.** Приведены характеристика лесного фонда Республики Башкортостан, его площадь, расчетная лесосека и качественные показатели. Отмечено увеличение доли мягколиственных пород в составе лесного фонда и снижение выхода деловой древесины в результате вырубки высокобонитетных сосняков. Обоснована актуальность размещения в регионе предприятия по переработке невостребованного низкокачественного древесного сырья – ООО «Кроношпан ОСБ», крупнейшего мирового производителя древесных плит. Рассматриваются вопросы обоснования сортиментации древесины и принятия сортиментного плана при эксплуатации арендуемых лесных участков на примере названного предприятия. Расчеты сортиментного плана (баланса раскряжевки) выполнены исходя из условия специализации на производстве целевых сортиментов, пользующихся высоким спросом на рынке, и максимального обеспечения сырьем собственного производства. Сортиментация круглых лесоматериалов определена с помощью созданной в Уральском государственном лесотехническом университете методики расчета ресурсов сортиментов. В основу методики положена раскряжевка больших выборок хлыстов лиственных и хвойных пород. Выборки хлыстов формировались на нижних складах лесозаготовительных предприятий Башкортостана, и их раскряжевка осуществлялась с учетом существующих технических требований к производству круглых лесоматериалов. В основе методики лежат уравнения регрессии, характеризующие связь коэффициентов максимального выхода сортиментов в зависимости от среднего диаметра хлыстов при их специализированной раскряжевке, которые были апробированы в условиях предприятий ПЛО «Башлеспром». При определении сортовой структуры фанерного бревна из березы и хвойного пиловочника из сосны также использовались уравнения регрессии, показывающие связь сортовой структуры и среднего диаметра раскряжевываемых хлыстов. Таким образом, выявлена требуемая сортиментация круглых лесоматериалов и объемы целевых сортиментов (фанерное бревно и пиловочник)

---

© Солдатов А.В., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Уразова А.Ф., 2025



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

только 1-го и 2-го сортов для их возможного применения профильными предприятиями и установлены объемы переработки древесины для ООО «Кроношпан ОСБ».

**Ключевые слова:** сортиментация древесины, раскряжевка хлыстов, ресурсы сортиментов, коэффициент максимального выхода, сортовая структура бревен, баланс раскряжевки

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет хоздоговорной НИР № Н-88/2022 от 03.10.2022 «Обоснование технологического процесса заготовки древесного сырья для эффективного сырьевого обеспечения производства древесных плит на предприятии ООО «Кроношпан ОСБ»».

**Для цитирования:** Солдатов А.В., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Уразова А.Ф. Обоснование сырьевого обеспечения лесопромышленного предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 128–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-128-142>

Original article

## Justification of Raw Material Supply for a Timber Industry Enterprise

*Aleksandr V. Soldatov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0684-8163>

*Eduard F. Gerts*<sup>✉</sup>, *Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: [O-6331-2018](https://orcid.org/0000-0003-0434-7282),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-7282>

*Andrey V. Mekhrentsev, 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, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;* ResearcherID: [AAD-2602-2020](https://orcid.org/0000-0003-2771-2334),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>

Ural State Forestry Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; [soldatovav@m.usfeu.ru](mailto:soldatovav@m.usfeu.ru), [gertsef@m.usfeu.ru](mailto:gertsef@m.usfeu.ru)<sup>✉</sup>, [mehrentsevav@m.usfeu.ru](mailto:mehrentsevav@m.usfeu.ru), [urazovaaf@m.usfeu.ru](mailto:urazovaaf@m.usfeu.ru)

---

*Received on July 10, 2024 / Approved after reviewing on October 15, 2024 / Accepted on October 19, 2024*

---

**Abstract.** The article presents the characteristics of the forest fund of the Republic of Bashkortostan, its area, estimated cutting area and quality indicators. An increase in the share of softwood species in the forest fund and a decrease in the yield of industrial wood as a result of the felling of high-quality pine forests have been noted. The relevance of placing in the region an enterprise for processing unclaimed low-quality wood raw materials, Kronoshpan OSB LLC, the world's largest manufacturer of wood boards, has been substantiated. The issues of substantiation of wood grading and the adoption of a bucking program during exploitation of leased forest plots have been considered using the example of the enterprise mentioned. The calculations of the bucking program (bucking balance) have been carried out based on the condition of specialization in the production of target grades that are in high demand in the market, and maximum provision of raw materials from our own production. Roundwood grading has been determined using the methodology for calculating assortment resources developed at the Ural State Forestry Engineering University. The methodology is based on bucking large samples of full-length logs of deciduous and coniferous species. The samples of full-length logs have been formed in the lower warehouses of Bashkortostan logging enterprises, and their bucking has been carried out taking into account the existing technical requirements for the production of roundwood. The methodology is based on regression equations characterizing the relationship between the ratios of the maximum yield of assortments

depending on the average diameter of full-length logs during their specialized bucking, which have been tested in the conditions of the enterprises of the Bashlesprom plant. When determining the varietal structure of birch plywood logs and pine sawlogs, regression equations have also been used to show the relationship between the varietal structure and the average diameter of the bucked full-length logs. Thus, the required assortment of roundwood and the volumes of target grades (plywood logs and sawlogs) of only grades 1 and 2 have been identified for their possible use by specialized enterprises, and the volumes of wood processing for Kronospan OSB LLC have been determined.

**Keywords:** wood grading, bucking, assortment resources, maximum yield ratio, log varietal structure, bucking balance

**Acknowledgements:** The study was carried out at the expense of the economic contractual research work no. N-88/2022 dated 03.10.2022 “Justification of the Technological Process of Harvesting Wood Raw Materials for Efficient Raw Material Supply for the Production Wood Boards at the Kronospan OSB LLC Enterprise.”

**For citation:** Soldatov A.V., Gerts E.F., Mekhrentsev A.V., Urazova A.F. Justification of Raw Material Supply for a Timber Industry Enterprise. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 128–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-128-142>

### *Введение*

Леса в Республике Башкортостан занимают 6,3 млн га (44 % территории). Основными лесобразующими породами являются береза (27,6 % покрытой лесом площади), липа (21,9 %), осина (16,5 %), сосна (15,3 %). Общий запас лесов оценивается в 708,4 млн м<sup>3</sup>, из которых 472,0 млн м<sup>3</sup> (66,6 %) составляют мягколиственные породы. Расчетная лесосека – 10,5 млн м<sup>3</sup>, в т. ч. по хвойному компоненту – 1,3 млн м<sup>3</sup> (11,9 %), по лиственному – 9,3 млн м<sup>3</sup> (88,1 %). В настоящее время высокобонитетные сосновые насаждения республики, дающие бóльшую часть пиловочника, оказались почти полностью вырубленными и сохранились лишь в удаленных горных лесах. Выход деловой древесины уменьшился до 60 %. Запас же спелых и перестойных березовых лесов – основного источника фанерного бревна превышает 98,6 млн м<sup>3</sup> (54,5 % общего запаса породы). В то же время фанерное производство республики только на 1/3 обеспечивается собственными ресурсами. Причина кроется в большом количестве пороков древесины местной березы. Этим объясняется низкий выход фанерного бревна: для древостоев семенного происхождения – 33 %, вегетативного – 25 % [2, 4, 5]. Холдинг «Кроношпан» является крупнейшим мировым производителем древесных плит. «Кроношпан» работает в ряде регионов России. Так, предприятие ООО «Кроношпан ОСБ» в г. Уфа в настоящее время производит 700 тыс. м<sup>2</sup> плит ОСБ (многослойная плита из прессованной и склеенной древесной стружки) и 850 тыс. м<sup>2</sup> древесностружечных плит ежегодно. Продукция предприятия реализуется на внутреннем рынке (порядка 2/3), при этом оно является крупнейшим экспортером на территории Республики Башкортостан.

### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования, которое было проведено в 2021–2023 гг., стали лесные участки, арендованные лесозаготовительным предприятием

ООО «Кроношпан ОСБ» для обеспечения сырья производства древесных плит. В настоящее время в аренде находятся площади, относящиеся к 9 лесничествам республики (табл. 1) [1].

Таблица 1

**Общая таксационная характеристика лесничеств,  
участки которых арендованы ООО «Кроношпан ОСБ»**  
**The general inventory characteristics of forestries, the areas of which are leased  
by Kronoshpan OSB LLC**

Лесничество	Площадь, тыс. га	Расчетная лесосека, тыс. м <sup>3</sup>	Средняя высота дре- востоя, м	Средний диаметр, см	Средний объем хлыста, м <sup>3</sup>	Средний запас, м <sup>3</sup> /га	Средняя полнота
Туймазинское	26,8	99,2	22	28	0,6	170	0,6
Уфимское	3,3	15,6	20	30	0,6	170	0,6
Иглинское	12,1	73,7	22	26	0,6	200	0,7
Архангельское	32,4	112,2	20	32	0,7	140	0,6
Гафурийское	12,7	48,3	20	30	0,6	140	0,6
Нуримановское	15,3	35,2	20	30	0,6	160	0,6
Караидельское	7,1	38,9	20	25	0,5	160	0,6
Салаватское	24,4	49,7	19	24	0,4	150	0,7
Белокатайское	24,7	86,0	20	25	0,5	150	0,7
<i>Итого</i>	158,8	558,7	20,5	28	0,6	159	0,6

Баланс раскряжевки хлыстов разрабатывается с учетом перечня типоразмеров (длина) по каждому сортименту и коммерческого запроса потребителей. Как правило, с целью упрощения технологического процесса производства число типоразмеров по каждому сортименту не превышает 2–3 [3, 6–11, 15–19, 21, 23, 24].

Расчет ресурсов сортиментов опирается на информацию о таксационных характеристиках древесных насаждений Белокатайского лесничества и предварительные требования заказчика по сортиментации. Расчеты ресурсов сортиментов и сортиментный план выполнены с принятием во внимание распределения объемов лесозаготовок по видам рубок (сплошные и выборочные) в разрезе лесных участков: Карлыхановского, Старобелокатайского, Новобелокатайского, Ургалинского. Изучение планового задания производства объемов сортиментов для указанного лесничества и предполагаемых условий рационального использования деловой древесины позволило предложить вариант сортиментации. Исходные данные для расчетов получены на основании лесного плана Республики Башкортостан на 2019–2028 гг. и планов освоения лесов.

В полном объеме расчеты выполнены для условий сплошных и выборочных рубок в эксплуатируемых древостоях Белокатайского лесничества. Технологический расчет потенциального выхода (ресурсов) сортиментов при ведении лесозаготовок в условиях лесничества и баланс раскряжевки древесины осуществлен по методике [10, 12, 14, 20, 22].

Таксационные данные по древесным породам (при сплошных рубках) представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Таксационная характеристика древесины для раскряжевки  
при сплошных рубках**  
**The inventory characteristics of wood for bucking during clear cuttings**

Древесная порода	Средний диаметр, см	Выход деловой древесины		Объем раскряжевки, м <sup>3</sup>	Разряд высот
		м <sup>3</sup>	%		
Сосна	26	81	88,04	92	3
Береза	26	5305	35,63	14890	3
Осина	24	9837	34,90	28186	3
Липа	26	13098	32,00	40931	4
Ель	24	182	82,90	220	4
Ольха серая	24	24	29,13	81	2
<i>Всего</i>		28527	33,80	84400	

В соответствии с методикой расчетов [14] для определения ресурсов выпиливаемых сортиментов используем формулу:

$$D_{i\mu d} = Q_p B_{r\mu} (EK_0 + LK) \cdot 0,000001,$$

где  $Q_p$  – объем раскряжевки  $r$ -й породы при известных  $D$  (средний диаметр, см) и  $\mu$  (разряд высот, тыс. м<sup>3</sup>);  $B_{r\mu}$  – выход деловой древесины при раскряжевке хлыстов, %;  $E$  – доля деловой древесины, получаемой из низкокачественных березовых хлыстов, %;  $K$  и  $K_0$  – коэффициенты максимального выхода  $i$ -го сортимента из древостоев  $\mu$ -го разряда высот при выборочном среднем диаметре соответственно из здоровых и низкокачественных хлыстов, %;  $L$  – доля деловой древесины из здоровых хлыстов.

Процентный состав сортовой структуры фанерного бревна вычислен с применением следующих формул для 3–4-го разрядов высот отдельно для здоровых и низкокачественных хлыстов:

из здоровых хлыстов

$$\text{для 1-го сорта: } S^{1,3-4,0} = 0,024D^2 - 1,332D + 65,695;$$

$$\text{для 2-го: } S^{2,3-4,0} = -0,017D^2 + 1,296D + 4,125;$$

из низкокачественных хлыстов

$$\text{для 1-го сорта: } S^{1,3-4,0} = 0,018D^2 - 1,023D + 48,788;$$

$$\text{для 2-го: } S^{2,3-4,0} = 0,001D^2 - 0,145D + 33,11.$$

Объем (м<sup>3</sup>) деловой древесины из хлыстов  $r$ -й породы  $\mu$ -го разряда высот рассчитывается по формуле

$$W_{r\mu} = 0,01Q_{r\mu}q_{r\mu},$$

где  $Q_{r\mu}$  – объем запаса  $r$ -й породы  $\mu$ -го разряда высот в лесосечном фонде, м<sup>3</sup>;  $q_{r\mu}$  – выход деловых круглых лесоматериалов из насаждений  $r$ -й породы  $\mu$ -го разряда высот в лесосечном фонде, %.

Как правило, расчеты выполняются по совокупности разрядов высот  $r$ -й породы, а также отдельно по хвойным и лиственным породам.

Хлысты, поступающие на раскряжевку, имеют определенный товарный потенциал. Обозначим здоровые хлысты как  $\varphi = 2$  и низкокачественные –  $\varphi = 3$ .

Доля (%) деловой древесины, получаемая из низкокачественных березовых хлыстов, определяется по формуле [5]:

$$E_{\mu}^D = 1,67D_{\mu} - 1,33q_{\mu} + 98,4, \quad (8)$$

где  $D_{\mu}$  – средний диаметр насаждения  $\mu$ -го разряда высот, см;  $q_{\mu}$  – выход деловой древесины из березы  $\mu$ -го разряда высот по лесотаксационной оценке, %.

Тогда доля (%) деловой древесины из здоровых хлыстов в общем объеме деловой древесины составит

$$\lambda_{\mu}^D = 100 - E_{\mu}^D.$$

Теперь можно определить объемный выход фанерного бревна (%) по формулам

$$W = W^{\varphi=2} + W^{\varphi=3};$$

$$W^{\varphi=2} = 10^{-6} \sum_{\mu \in M} Q_{\mu} q_{\mu} \lambda_{\mu} K_{\mu}^{\varphi=2,D};$$

$$W^{\varphi=3} = 10^{-6} \sum_{\mu \in M} Q_{\mu} q_{\mu} E_{\mu} K_{\mu}^{\varphi=3,D},$$

где  $W^{\varphi=2}$ ,  $W^{\varphi=3}$  – объемный выход фанерного бревна из здоровых и низкокачественных хлыстов соответственно, м<sup>3</sup>;  $Q_{\mu}$  – объем запаса березы  $\mu$ -го разряда высот в лесосечном фонде, м<sup>3</sup>;  $q_{\mu}$  – выход деловых круглых лесоматериалов из эксплуатируемых березовых насаждений;  $E_{\mu}$  и  $\lambda_{\mu}$  – доля деловой древесины соответственно из низкокачественных и здоровых березовых хлыстов в общем объеме деловой древесины;  $K_{\mu}^{\varphi=2,D}$ ,  $K_{\mu}^{\varphi=3,D}$  – коэффициент максимального выхода фанерного бревна из здоровых и низкокачественных хлыстов  $\mu$ -го разряда высот при среднем диаметре  $D$  (%), соответственно [13].

### Результаты исследования и их обсуждение

Ресурсы сортиментов при выполнении сплошных рубок и структура сортиментного плана приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Ресурсы сортиментов при сплошных рубках**  
**The assortment resources for clear cuttings**

Наименование сортимента, длина, м	Объем деловой древесины, м <sup>3</sup>	Объем по разрядам высот, м <sup>3</sup>			Потенциальный выход	
		3	4	2	м <sup>3</sup>	%
Пилоочник хвойный, 4, 6	263,4	69,6	154,1	–	224,0	84,95
Пилоочник экспортный хвойный, 6		66,3	139,2	–	205,5	78,03
Шпальное бревно хвойное, 2,75		14,8	27,4	–	42,3	16,05
Руддолготье хвойное, 4, 6		15,5	28,4	–	43,9	16,67
Рудничная стойка хвойная (по спецификации)		47,3	122,2	–	169,5	64,36
Пилоочник лиственный (осина, липа, ольха), 3, 4	22 958,4	7 731,0	10 056,0	19,1	17 805,1	77,55

Окончание табл. 3

Наименование сортимента, длина, м	Объем деловой древесины, м <sup>3</sup>	Объем по разрядам высот, м <sup>3</sup>			Потенциальный выход	
		3	4	2	м <sup>3</sup>	%
Пиловочник лиственный (береза), 3, 4	5305,3	3856,0	–	–	3856,3	72,69
Тарное бревно лиственное (береза), 2, 4		2582,4	–	–	2582,4	48,68
Фанерное бревно (береза), 1,6, 3,2		2536,0	–	–	2536,0	47,80
Подтоварник лиственный (осина, липа, ольха), 5	22 958,4	1194,0	2240,0	2,3	3436,3	14,97
Подтоварник лиственный (береза), 5	5305,3	726,2	0	–	726,2	13,69
Балансы экспортные по ГОСТ 22296–76, 2		3104,7	0	–	3104,7	58,52
Балансы для целлюлозы, предназначенной для химической переработки (береза), 2		1850,2	0	–	1850,2	34,87
Балансы для сульфатной, сульфитной целлюлозы и химической древесной массы (береза), 2		2725,8	0	–	2725,8	51,38
Спичечное бревно (осина, липа, ольха), 1,7, 3,4	22 958,4	5336,0	6476,4	13,4	11 825,8	51,50
Спичечное бревно (осина, липа, ольха), 5		4734,0	5264,0	12,7	10 010,7	43,60
Клепочное бревно (осина, липа, ольха), 3,1		3417,5	3959,2	10,2	7387,0	32,18
Балансы для целлюлозы, предназначенной для химической переработки (осина, липа, ольха), 2		3605,0	3591,0	5,4	7201,0	31,37

Баланс раскряжевки хлыстов и предлагаемая структура сортиментации круглых лесоматериалов будет выглядеть следующим образом (табл. 4).

Таблица 4

**Структура сортиментного плана при сплошных рубках**  
**The bucking program structure for clear cuttings**

Наименование сортимента	Объем, м <sup>3</sup>		Содер- жание, %	Диаметр, см	Длина, м	Сорт	Формула расчета
	годовой	суточный					
Пиловочник хвойный	224	0,89	0,27	≥14	4, 6	1–4	$Q_{\text{пил. хв}} = R_{\text{пил. хв}}$
Балансы хвой- ные	39	0,16	0,05	6...24	4	2, 3	$Q_{\text{бал. хв}} = V_{\text{дел. хв}} - R_{\text{пил. хв}}$
Фанерное брев- но (береза)	2536	10,14	3,00	≥16	3,2	1, 2	$Q_{\text{ф.б}} = R_{\text{ф.б}}$
Пиловочник лиственный	19 125	114,65	33,96	≥14	3, 4	1–4	$Q_{\text{пил. лв}} = R_{\text{пил. б}} + R_{\text{пил. ос}} - R_{\text{ф.б}}$

Окончание табл. 4

Наименование сортимента	Объем, м <sup>3</sup>		Содержание, %	Диаметр, см	Длина, м	Сорт	Формула расчета
	годовой	суточный					
Балансы лиственные	6602	37,32	11,06	6...24	4	2, 3	–
Итого деловой древесины	28 527	163,18	48,33	–	–	–	–
Технологическое сырье	15 969	51,12	15,14	≥6	4	Без сорта	–
Дрова топливные	39 904	123,31	36,62	≥6	2	Без сорта	–
Итого дровяной древесины	55 873	174,42	51,67	–	–	–	–
Всего	84 400	337,60	100	–	–	–	–
Отходы раскряжевки	1321	13,50	4,00	–	–	–	–

Примечание: *R* – ресурсы сортиментов; пил. хв – пиловочник хвойный; бал. хв, бал. лв – балансы хвойные и лиственные соответственно; дел. хв, дел. лв – деловая хвойная и лиственная древесина соответственно; ф. б – фанерное бревно (береза); пил. лв – пиловочник лиственный; пил. б, пил. ос – пиловочник лиственный из березы и осины соответственно.

Таксационная характеристика древесины, поступающей на раскряжевку при выборочных рубках приведена в табл. 5.

Таблица 5

**Таксационная характеристика древесины для раскряжевки  
при выборочных рубках  
The inventory characteristics of wood during selective cutting**

Древесная порода	Средний диаметр, см	Выход деловой древесины,		Объем раскряжевки, м <sup>3</sup>	Разряд высот
		м <sup>3</sup>	%		
Сосна	24	253,32	72,20	351	3
Береза	26	407,10	40,70	1000	3
Осина	26	22,60	33,23	68	3
Липа	24	94,34	32,60	117	4
Ель	24	39,00	39,40	99	4
<i>Всего</i>		816,00	49,93	1635	–

Выполненные расчеты ресурсов сортиментов от выборочных рубок приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Ресурсы сортиментов при выборочных рубках, м<sup>3</sup>  
The assortment resources for selective cuttings, m<sup>3</sup>**

Наименование сортимента	Объем деловой древесины, м <sup>3</sup>	Объем по разрядам высот, м <sup>3</sup>			Потенциальный выход (ресурс)	
		3	4	2	м <sup>3</sup>	%
Пиловочник хвойный	292	213,50	30,93	–	244,43	83,62
Пиловочник экспортный хвойный		196,00	25,96	–	222,03	76,96
Шпальное бревно хвойный		41,38	5,69	–	47,08	16,10

Окончание табл. 6

Наименование сортамента	Объем деловой древесины, м <sup>3</sup>	Объем по разрядам высот, м <sup>3</sup>			Потенциальный выход (ресурс)	
		3	4	2	м <sup>3</sup>	%
Руддолготье хвойное	292	48,36	5,79	–	54,16	18,53
Рудничная стойка хвойная (по спецификации)		147,40	25,14	–	172,58	59,04
Пиловочник лиственный (осина, липа)	117	18,00	73,00	–	90,72	77,58
Пиловочник лиственный (береза)	407	297,00	–	–	297,05	72,97
Тарное бревно лиственное (береза)		191,60	–	–	191,65	47,08
Фанерное бревно (береза)		198,00	–	–	198,30	48,71
Подтоварник лиственный (осина, липа, ольха)	117	2,74	16,15	–	18,89	16,16
Подтоварник лиственный (береза)	407	56,40	–	–	56,40	13,85
Балансы экспортные по ГОСТ 22296–76 (береза)		239,70	–	–	239,74	58,89
Балансы для сульфатной, сульфитной целлюлозы и химической древесной массы (береза)		204,00	–	–	204,08	50,13
Спичечное бревно (осина, липа, ольха) – длина 5 м	117	10,88	36,87	–	49,13	42,02
Балансы для целлюлозы, предназначенной для химической переработки (осина, липа, ольха)		8,27	25,44	–	33,72	28,83
Балансы для сульфатной, сульфитной целлюлозы и химической древесной массы (осина, липа, ольха)		8,64	43,82	–	52,46	44,86

Сортаментация древесины и баланс раскряжевки от выборочных рубок приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Структура сортаментного плана при выборочных рубках**  
**The structure of the bucking program for selective cuttings**

Наименование сортамента	Объем, м <sup>3</sup>		Содержание, %
	годовой	суточный	
Пиловочник хвойный	244	0,98	14,95
Балансы хвойные	48	0,19	2,93
Фанерное бревно (береза)	198	0,79	12,13

Окончание табл. 7

Наименование сортамента	Объем, м <sup>3</sup>		Содержание, %
	годовой	суточный	
Пиловочник лиственный	189	0,76	11,59
Балансы лиственные	136	0,55	8,33
Итого деловой древесины	816	3,27	49,93
Технологическое сырье	324	1,30	19,84
Дрова топливные	494	1,98	30,23
Итого дровяной древесины	819	3,27	50,07
Всего	1635	6,54	100
Отходы раскряжевки	65	0,26	4,00

В табл. 8 дана общая характеристика долевого участия объемов древесины, заготавливаемой на каждом из участков, в общем объеме производства для Белокатайского лесничества.

Таблица 8

**Долевое участие древесины, заготавливаемой на лесных участках,  
в годовом объеме производства Белокатайского лесничества**  
**The share of wood harvested in forest areas in the annual production volume  
of the Belokataysky forestry**

Лесной участок	Годовой объем, м <sup>3</sup>	Доля, %
Карлыхановское	7360	0,0855
Старобелокатайское	37 821	0,4396
Новобелокатайское	15 462	0,1797
Ургалинское	25 392	0,2951
<i>Итого</i>	86 035	1

В разрезе лесных участков с учетом табл. 7 расчетная сортиментная структура примет вид, представленный в табл. 9.

Таблица 9

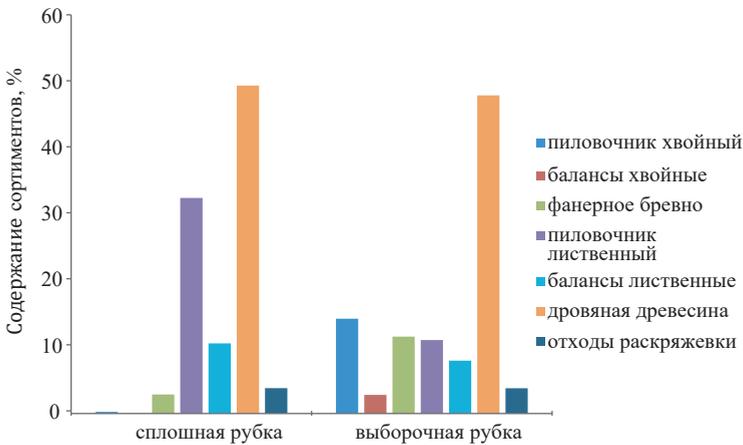
**Расчетная сортиментная структура в разрезе лесных участков  
Белокатайского лесничества, м<sup>3</sup>**  
**The estimated assortment structure in the context of forest areas  
of the Belokataysky forestry, m<sup>3</sup>**

Наименование сортамента	Годовой объем рубки			Карлыхановское	Старобелокатайское	Новобелокатайское	Ургалинское
	Выборочные	Сплошные	Итого				
Пиловочник хвойный	244	224	468	40	205	84	137,9
Балансы хвойные	48	39	88	8	39	16	26,1
Фанерное бревно (береза)	198	2536	2734	234	1202	491	807,0
Пиловочник лиственный	189	28 663	28 853	2468	12 684	5185	8515,5
Балансы лиственные	136	9331	9467	810	4162	1701	2794,1
Итого деловой древесины	816	40 794	41 610	3560	18 292	7478	12 280,7

Окончание табл. 9

Наименование сортамента	Годовой объем рубки			Карлыхановское	Старобелокатайское	Новобелокатайское	Ургалинское
	Выборочные	Сплошные	Итого				
Технологическое сырье	324	12 779	13 104	1121	5760	2355	3867,4
Дрова топливные	494	30 827	31 321	2679	13 769	5629	9243,9
Итого дровяной древесины	819	43 606	44 425	3800	19 529	7984	13 111,3
Всего	1635	84 400	86 035	7360	37 821	15 462	25 392,0
Отходы раскряжки	65	3376	3441	294	1513	618	1015,6

Визуализация структуры сортиментного плана по Белокатайскому лесничеству в разрезе рубок приведена на рисунке.



Структура сортиментного плана Белокатайского лесничества  
The structure of the bucking problem of the Belokataysky forestry

По условиям формирования сортиментации и расчета баланса раскряжки хлыстов с учетом предложений заказчика был сформирован вариант сортиментного плана (табл. 10). Отличием данного варианта от плана сортиментации, приведенного выше (см. табл. 4, 7) является стремление предоставить производству необходимое сырье. Однако найден компромиссный вариант использования древесных ресурсов с принятием во внимание вычленения объемов высококачественной древесины для ее реализации другими производствами и обеспечения основного плитного производства в условиях ООО «Кроношпан ОСБ». При определении сортовой структуры фанерного бревна из березы и лиственного пиловочника применялась методика [13].

Таблица 10

Вариант сортиментации для Белокатайского лесничества  
An assortment option for the Belokataysky forestry

Наименование сортамента	Годовой объем производства, м <sup>3</sup>	Содержание, %	Примечание
Пиловочник хвойный	468	0,5	Ресурс
осиновый	754	0,9	Остаток от ресурса

Окончание табл. 10

Наименование сортимента	Годовой объем производства, м <sup>3</sup>	Содержание, %	Примечание
липовый	2025	2,3	1, 2 сорт (20 %) от ресурса
Фанерное бревно из березы	2536	2,94	Ресурс, сплошные рубки
из осины	4734	5,5	Ресурс спичечного кряжа при сплошных рубках
Итого деловой древесины	10 517	12,2	–
Технологическое сырье	73 597	85,6	–
Итого выпуск деловой древесины	84 114	97,8	–
Дрова топливные	1921	2,2	Потребность (план)
Всего	86 035	100	–
Отходы раскряжевки	3441	4	–

В качестве примера в табл. 11 показаны результаты расчета сортовой структуры фанерного бревна при раскряжевке березовых хлыстов 3-го разряда высот следующей товарности: запас – 14 890 м<sup>3</sup>; выход деловой древесины – 35,6 %; средний диаметр насаждений – 26,0 см.

Таблица 11

**Результаты расчета сортовой структуры фанерного бревна (береза)**  
**The results of the calculation of the varietal structure of plywood logs (birch)**

Рассчитываемые значения	Из здоровых хлыстов	Из низкокачественных хлыстов
Доля делового сырья, %	58,54	41,46
Коэффициент максимального выхода фанерного бревна, %	52,79	41,45
Объемный выход фанерного бревна, м <sup>3</sup>	1600	1134
Долевое участие для древесины		
1-го сорта, %	38,5	30,4
2-го сорта, %	23,8	32,4
Объемный состав для древесины		
1-го сорта, м <sup>3</sup>	616	345
2-го сорта, м <sup>3</sup>	381	367

Пояснения к итоговым сортиментации и балансу раскряжевки древесины в условиях Белокатайского лесничества, согласованным с предприятием:

1) Объем технологического сырья определен с учетом хвойных и лиственных балансов.

2) Планируемый объем фанерного бревна из осины взят равным ресурсу спичечного бревна длиной 5 м, т. е. 4734 м<sup>3</sup>, причем только от сплошных рубок.

3) Проектируемый объем пиловочника из осины принят равным 25 % (3-й сорт) от разницы между ресурсом пиловочника и плановым заданием фанерного бревна, т. е. осиновый пиловочник:  $(7731 + 18) - 4734 = 3015$ , т. е.  $3015 \cdot 0,25 = 754$  м<sup>3</sup>. Остальной объем древесины переведен в технологическое сырье.

4) Запланированный объем пиловочника из липы принят в объеме всей древесины 1-го и 2-го сортов (20 %) от общего ресурса, т. е.

$(10056 + 73) \cdot 0,2 = 2025 \text{ м}^3$ . Оставшийся пиловочник рассматривается как технологическое сырье.

5) Следует обратить внимание на ресурс фанерного бревна из березы ( $2536 \text{ м}^3$ ), что недостаточно при плановых объемах производства  $8309 \text{ м}^3$ .

6) Возможен вариант, когда пиловочник из мягколиственных пород не выпиливается, т. е. этот объем древесины переводим в технологическое сырье.

### Заключение

Использование разработанных в Уральском государственном лесотехническом университете методик расчета ресурсов круглых лесоматериалов и их сортовой структуры, а также программного обеспечения позволяет оценить эксплуатируемые лесные древостои и выявить потенциальные объемы сортиментов целевого назначения.

На основе предполагаемого выхода целевых сортиментов составляется план раскряжевки хлыстов (сортиментный план предприятия) с учетом действующих приоритетов или с целью принятия решения о проектировании цехов по переработке древесины.

Для ООО «Кроношпан ОСБ» были выявлены объемы собственного ресурса фанерного бревна (из березы, осины), пиловочника хвойного, лиственного при эксплуатации древостоев арендуемых лесных участков. Кроме того, установлены требуемые объемы закупки древесного сырья для обеспечения основного производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Загидуллин Д.А., Герц Э.Ф. Перспективы заготовки древесины ООО «Кроношпан ОСБ» // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIX Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Уральск. гос. лесотехн. ун-т, г. Екатеринбург: УГЛТУ, 2023. С. 129–132.

Zagidullin D.A., Gerts E.F. Prospects for Harvesting Wood LLC “Kronoshpan OSB”. *Scientific Creativity of Youth – for the Forestry Complex of Russia: Materials of the XIX All-Russian (National) Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduate Students*. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University, 2023, pp. 129–132. (In Russ.).

2. Лесной план Республики Башкортостан 2019–2028 гг. Министерство лесного хозяйства: сайт. Режим доступа: <https://forest.bashkortostan.ru/documents/active/219577/> (дата обращения: 12.04.24).

Forestry Plan of the Republic of Bashkortostan 2019–2028. *Ministry of Forestry: Website*. (In Russ.).

3. Медведев Н.А. Научные основы размещения лесопромышленных предприятий // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 2. С. 40–46.

Medvedev N.A. Scientific Bases of Placing Timber Enterprises. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 40–46. (In Russ.).

4. Мошкалев А.Г. Таксация товарной структуры древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 157 с.

Moshkalev A.G. *Inventory of the Commodity Structure of Forest Stands*. Moscow, *Lesnaya promyshlennost' Publ.*, 1982. 157 p. (In Russ.).

5. Нагимов З.Я., Коростелев И.Ф., Шевелина И.В. Таксация леса. Переизд. Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. 300 с.

Nagimov Z.Ya., Korostelev I.F., Shevelina I.V. *Forest Inventory*: Reprint. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2006. 300 p. (In Russ.).

6. Некрасов М.Д. Об экономической оценке лесных ресурсов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 5. С. 124–130.

Nekrasov M.D. On Economic Assessment of Forest Resources. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2006, no. 5, pp.124–130. (In Russ.).

7. Починков С.В. Экономические основы устойчивого лесопользования: Эффективное освоение и воспроизводство лесных ресурсов: моногр. СПб.: Проффикс, 2007. 112 с.

Pochinkov S.V. *Economic Foundations of Sustainable Forest Management: Effective Development and Reproduction of Forest Resources*: Monograph. St. Petersburg, Proficis Publ., 2007. 112 p. (In Russ.).

8. Прешкин Г.А. Коммерческая оценка лесных участков. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. 47 с.

Preshkin G.A. *Commercial Evaluation of Forest Areas*. Yekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2009. 47 p. (In Russ.).

9. Прешкин Г.А. Нормативы оценки лесных благ: моногр. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2011. 319 с.

Preshkin G.A. *Standards for the Assessment of Forest Assets*: Monograph. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2011. 319 p. (In Russ.).

10. Прешкин Г.А., Солдатов А.В. Моделирование специализированной раскряжевки осиновых и березовых хлыстов // Изв. вузов. Лесн. журн. 1989. № 3. С. 43–48.

Preshkin G.A., Soldatov A.V. Modeling of Specialized Bucking of Aspen and Birch Full-Length Logs. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1989, no. 3, pp. 43–48. (In Russ.).

11. Прешкин Г.А., Яндыганов Я.Я., Власова Е.Я. Методические подходы к экономической оценке древесных ресурсов на основе региональных нормативов // Изв. Урал. гос. экон. ун-та. Екатеринбург: УрГЭУ, 2011. № 1(33). С. 142–150.

Preshkin G.A., Yandyganov Ya.Ya., Vlasova E.Ya. Methodological Approaches to the Economic Assessment of Wood Resources Based on Regional Standards. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* = Journal of New Economy. Ekaterinburg, Ural State University of Economics, 2011, no. 1(33), pp.142–150. (In Russ.).

12. Солдатов А.В., Коркин Е.С. Методика расчета выхода объема круглых лесоматериалов при раскряжевке березовых и осиновых хлыстов // Леса Урала и хозяйство в них. 2006. № 27. С. 303–308.

Soldatov A.V., Korkin E.S. Methodology for Calculating the Volume Output of Round Timber during Bucking of Birch and Aspen Full-Length Logs. *Lesa Urala i khozyajstvo v nikh*, 2006, no. 27, pp. 303–308. (In Russ.).

13. Солдатов А.В., Коркин Е.С., Ковалев Р.Н. Определение сортовой и объемной структуры потенциального выхода фанерного кряжа из березы // Лесной и химический комплекс – проблемы и решения: науч.-техн. конф. Красноярск: СибГТУ, 2006. Т. 3. С. 10–13.

Soldatov A.V., Korkin E.S., Kovalev R.N. Determination of the Varietal and Volumetric Structure of the Potential Yield of Birch Veneer Logs. *Lesnoj i khimicheskij kompleks – problemy i resheniya*: Scientific and Technical Conferemce. Krasnoyarsk, Siberian State Technological University Publ., 2006, vol. 3, pp. 10–13. (In Russ.).

14. Солдатов А.В., Чамеев В.В. Технологический расчет объемов сырья при проектировании лесобработывающих цехов: методич. указ. / Урал. гос. лесотехн. ун-т, кафедра технологии и оборудования лесопромышленного производства. Екатеринбург, 2017. 32 с.

Soldatov A.V., Chameev V.V. *Technological Calculation of Raw Material Volumes When Designing Woodworking Shops*: Methodological Guidelines. Ural State Forestry Engineering University, Department of Technology and Equipment of Timber Industry Production. Ekaterinburg, 2017. 32 p. (In Russ.).

15. Уиллиамс М.С. Рациональное использование лесных ресурсов / пер. с англ. М.: Экология, 1991. 128 с.  
Williams M.S. *Rational Use of Forest Resources*: Transl. from Eng. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 128 p. (In Russ.).
16. Холина В.Н. Основы экономики природопользования. СПб.: Питер, 2005. 672 с.  
Kholina V.N. *Fundamentals of Economics of Nature Management*. St. Petersburg, Piter Publ., 2005. 672 p. (In Russ.).
17. Чупров Н.П. Методика экономической оценки лесных ресурсов и лесных земель, доступности древесных ресурсов и формирование квоты на ресурсы: методич. рекомендации. Архангельск: Сев. науч.-исслед. ин-т лесн. хоз-ва, 2003. 45 с.  
Chuprov N.P. *Methodology of Economic Assessment of Forest Resources and Forest Lands, Availability of Wood Resources and Formation of Resource Quotas: Methodical Recommendations*. Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry Publ., 2003. 45 p. (In Russ.).
18. Bezrukova T.L., Larionov V.G., Kuksova I.V. Ecological and Economic Management Tools in Forestry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 875, art. no. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012044>
19. Mokhiev A.P., Dudin P.O. Evaluation of the Portfolio of Commercial Products of a Timber Procurement Enterprise with Maximizing the Use of Raw Materials. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 108, art. no. 14008. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410814008>
20. Pak M., Turker M.F. Estimation of Recreational Use Value of Forest Resources by Using Individual Travel Cost and Contingent Valuation Methods (Kayabasi Forest Recreation Site Sample). *Journal of Applied Sciences*, 2006, vol. 6, iss. 1, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3923/jas.2006.1.5>
21. Pozdnyakova M.O., Mokhiev A.P., Ryabova T.G. Comprehensive Evaluation of Technological Measures for Increasing Availability of Wood Resources. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, br. 4, pp. 565–569. <https://doi.org/10.5937/jaes16-18842>
22. Soldatov A.V., Preshkin G.A. Metodologia delle Norme Sulla Fisclita e Valove dei Uscita Assortimento Accessibilita Tecnologica delle Materie Prime di Ligno Inoggetti di Gestione Forestale. *Italian Science Review*, 2016, no. 1(34), pp. 98–103. (In Ital.).
23. Vladimirova E., Rykunin S., Shalaev V. Using of Knotty Wood Features in the Manufacture of Final Sawn Production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. no. 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012081>
24. Yakusheva M., Mokhiev A., Dudin P. Specific Features of Wood Resources Processing at Forest Industry Enterprises. *BIO Web of Conferences*, 2024, vol. 93, art. no. 01021. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301021>

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

Научная статья

УДК 691.113;624.048;674.051

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-143-153

## Определение скрытых дефектов в перекрестноклееных плитах из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.)

**А.С. Королев**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285),

*ORCID*: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

**Е.С. Шарапов**, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

**О.С. Егошин**, аспирант; *ResearcherID*: [HLQ-6804-2023](https://orcid.org/0009-0002-8076-8345),

*ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-8076-8345>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; korolevas@volgatech.net<sup>✉</sup>, sharapoves@volgatech.net, egoshin.o.s@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.24 / Одобрена после рецензирования 09.06.24 / Принята к печати 10.06.24

**Аннотация.** Перекрестноклееная древесина – один из перспективных строительных материалов. Существующая отечественная нормативно-техническая база не регламентирует неразрушающий контроль качества, а также обследование и мониторинг технического состояния плит из такой древесины, при этом результаты практического применения основных методов неразрушающего контроля для этих целей ограничено представлены в научной литературе. Цель работы заключается в оценке возможности и точности выявления скрытых дефектов в плитах из перекрестноклееной древесины акустическим методом и измерением сопротивления сверлению. Исследование проводили на образцах плит размером 100×100 мм, разной толщины, изготовленных из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.). Скрытыми дефектами являются полости внутри плит, пораженность гнилью заготовок для слоя, участки с отсутствием клеевой прослойки. Акустический неразрушающий контроль осуществляли велосиметрическим методом с использованием ультразвуковых приборов «Пульсар 2.2» и Pundit PL-200. Для получения профиля сопротивления сверлению по толщине плиты применяли мобильное устройство IML-RESI PD 400 со стандартными тонкими буровыми сверлами с диаметром режущей части 3 мм. В работе представлены результаты зонального акустического сканирования плит из перекрестноклееной древесины в виде контурных графиков, на которых отражены скорости ультразвукового сигнала по всей плоскости плиты, а также профили сопротивления сверлению в местах заложённых дефектов. На основании попарного сравнения медиан по U-критерию Манна–Уитни и законов распределений скоростей ультразвукового сигнала для плит толщиной 120 и 200 мм, по критерию Колмогорова–Смирнова (для плит 120 мм) установлено отсутствие статистически значимых различий между выборками. Скорость ультразвуковой волны 1400 м/с является граничным значением, характеризующим наличие внутреннего дефекта в плите. Было показано, что метод измерения сопротивления сверлению не дает возможности выявить присутствие или отсутствие клеевого шва в исследованных плитах. Зональное сканирование велосиметрическим методом и определение сопротивления сверлению позволяют визуально представить наличие внутренних дефектов в виде профилей сопротивления сверлению и контурных графиков скоростей.

**Ключевые слова:** акустический неразрушающий контроль, дефектоскопия, качество, обследование, перекрестноклееная древесина, резистограф, сопротивление сверлению

**Благодарности:** Работа выполнена по гранту РФФИ № 23-16-00220, <https://rscf.ru/project/23-16-00220/> с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

**Для цитирования:** Королев А.С., Шарапов Е.С., Егошин О.С. Определение скрытых дефектов в перекрестноклееных панелях из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 143–153. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-143-153>

Original article

## Detection of Hidden Defects in Cross-Laminated Pine (*Pinus sylvestris* L.) Panels

**Aleksandr S. Korolev**<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [JKI-0714-2023](https://orcid.org/0009-0000-1370-1285),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1370-1285>

**Evgenii S. Sharapov**, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [B-8151-2014](https://orcid.org/0000-0002-6500-5377),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>

**Oleg S. Egoshin**, Postgraduate Student; ResearcherID: [HLQ-6804-2023](https://orcid.org/0009-0002-8076-8345),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8076-8345>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; korolevas@volgatech.net<sup>✉</sup>, sharapoves@volgatech.net, egoshin.o.s@mail.ru

Received on March 28, 2024 / Approved after reviewing on June 9, 2024 / Accepted on June 10, 2024

**Abstract.** Cross-laminated timber is one of the promising construction materials. The existing domestic regulatory and technical framework does not regulate non-destructive testing, as well as examination and monitoring of the technical condition of cross-laminated timber panels, while the results of the practical application of the basic methods of non-destructive testing for these purposes are limitedly presented in the scientific literature. The aim of the research has been to assess the possibility and accuracy of detecting hidden defects in cross-laminated timber panels using the acoustic method and measuring the drilling resistance. The research has been conducted on samples of 100×100 mm panels of different thickness, made of pine wood (*Pinus sylvestris* L.). Hidden defects include cavities inside the panels, rot in the billets for the layer, and areas with no adhesive layer. Acoustic non-destructive testing has been carried out by the velocimetric method using ultrasonic devices “Pulsar 2.2” and Pundit PL-200. To obtain the drilling resistance profile across the panel thickness, an IML-RESI PD 400 mobile device has been used with standard thin drill bits with a cutting diameter of 3 mm. The paper presents the results of zonal acoustic scanning of cross-laminated timber panels in the form of contour graphs, which reflect the ultrasonic signal speeds along the entire plane of the panel, as well as drilling resistance profiles in places of inherent defects. Based on a pairwise comparison of the medians using the Mann-Whitney U-test and the laws of velocity distributions of the ultrasonic signal for panels with a thickness of 120 and 200 mm, according to the Kolmogorov-Smirnov test (for panels measuring 120 mm), the absence of statistically significant differences between the samples has been established. The ultrasonic wave velocity of 1,400 m/s has been the boundary value characterizing the presence of an internal defect in the panel. It has been shown that the method of measuring drilling resistance does not allow detecting the presence or absence of an adhesive line in

the studied panels. Zonal scanning using the velocimetric method and determination of drilling resistance make it possible to visually represent the presence of internal defects in the form of drilling resistance profiles and contour velocity graphs.

**Keywords:** acoustic non-destructive testing, defect detection, quality, examination, cross-laminated timber, resistograph, drilling resistance

**Acknowledgements:** The work was carried out under the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00220, <https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/> using the equipment of the Collective Use Centre “Ecology, Biotechnology and Processes for Obtaining Environmentally Friendly Energy Carriers” of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

**For citation:** Korolev A.S., Sharapov E.S., Egoshin O.S. Detection of Hidden Defects in Cross-Laminated Pine (*Pinus sylvestris* L.) Panels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 143–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-143-153>

### Введение

В России и за рубежом растет применение плит из перекрестноклееной древесины (ДПК) в качестве несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений. Их активное внедрение в строительной отрасли обусловлено возможностью широкого использования, в т. ч. комбинирования с другими строительными материалами. В нашей стране требования к качеству материала и общие технические требования, такие как геометрические размеры, количество слоев, прочностные и упругие характеристики, а также показатели поверхности и правила приема плит из ДПК устанавливает ГОСТ Р 56706–2022 «Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия». Вместе с тем данный стандарт не регламентирует методы контроля скрытых дефектов в плитах, которые могут значимо влиять на прочностные и эксплуатационные свойства клееных деревянных конструкций.

Акустические методы неразрушающего контроля применимы для установления участков с отслоениями или отсутствием клеевой прослойки в клееных деревянных элементах конструкций [9, 11]. При этом результаты измерений акустических характеристик ДПК могут быть представлены в виде контурных графиков с выделением бездефектных участков плит, имеющих высокую скорость акустического сигнала по сравнению с участками без клеевой прослойки, сердцевинной или сучками [18]. В процессе производства ДПК или их эксплуатации древесина в плите может быть поражена дереворазрушающими грибами, в этом случае скорость прохождения акустического сигнала также снижается [1, 16, 17, 25].

Исследования [10, 12, 21, 27, 28] посвящены определению упругих характеристик плит из ДПК с целью оценки их качества и несущей способности. Модуль упругости и сдвига могут быть установлены с помощью резонансного акустического метода, основанного на возбуждении вынужденных упругих колебаний в плите или ее части и их последующем анализе. Данный метод трудноосуществим для плит, являющихся частью здания или конструкции, ввиду наличия продольных и поперечных связей элементов конструкции, влияющих на результаты измерений [27].

С целью обследования и мониторинга элементов деревянных конструкций активно применяется измерение сопротивления сверлению [2, 6, 7, 13, 14, 19, 23, 26], основанное на фиксации энергосиловых параметров процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами [5]. Сопротивление древесины

сверлению высоко связано с плотностью и механическими свойствами древесины [7, 15, 20, 22, 26].

Плиты из ДПК являются относительно новым строительным материалом, а применение современных методов неразрушающего контроля характеристик и внутреннего состояния древесины в плитах не регламентированы и апробированы лишь частично [3, 4]. В связи с этим целью данной работы стала оценка возможности и точности выявления скрытых дефектов в плитах из ДПК велосимметрическим акустическим методом и методом измерения сопротивления сверлению.

### Объекты и методы исследования

Для изготовления плит из ДПК применяли пиломатериал из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) камерной сушки номинальным размером 2100×85×44 мм и влажностью 10–12 %. Из пиломатериала получены заготовки длиной 1050 мм и в дальнейшем откалиброваны до размеров в поперечном сечении 40×80 мм. На следующем этапе произвели сортировку заготовок по качеству. Для внешних слоев плит отбирали заготовки без пороков тангенциального распила, а для внутренних – заготовки слоя тангенциального распила со здоровыми сучками. Было изготовлено 2 плиты размерами 1000×1000×120 и 1000×1000×200 мм, соответственно 3- и 5-слойные по ГОСТ Р 56706–2022 с дефектами в центральном слое. Для каждой плиты разработаны схемы центральных слоев (рис. 1) со следующими дефектами: полости (частичное отсутствие заготовки слоя) 80×80×40 и 675×30×40 мм в плите; слой, выполненный из заготовки, пораженной пестрой гнилью, размеры пораженного участка в готовом изделии – 1000×80(160) мм; непроклеенный участок 80×160 мм между смежными слоями плиты. Выбор дефектов был обусловлен высокой вероятностью их появления в условиях реального производства, а также их значимого влияния на прочностные характеристики плит [24].

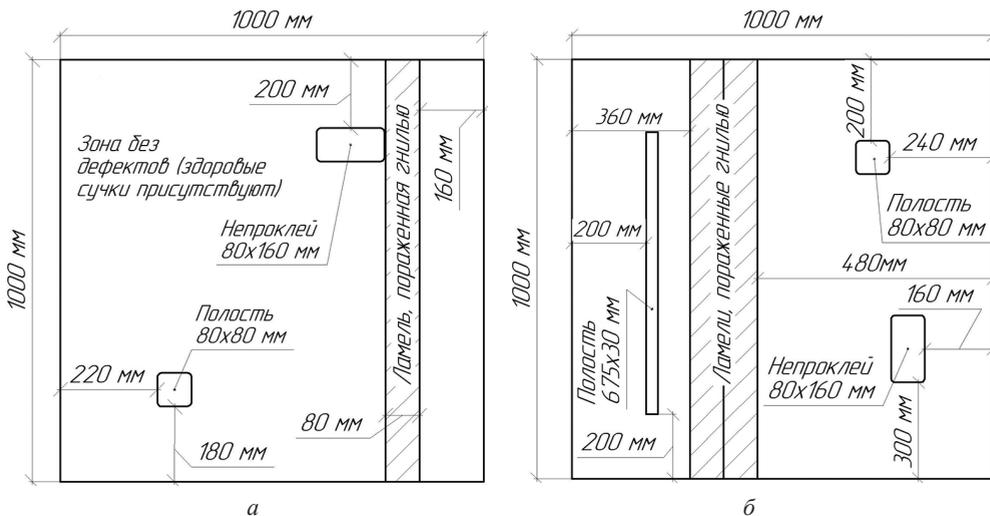


Рис. 1. Схема расположения дефектов в центральном слое плиты из перекрестноклееной древесины: а – 3-слойная; б – 5-слойная

Fig. 1. The layout of defects in the central layer of a cross-laminated timber panel: а – 3-layer; б – 5-layer

Для склеивания слоев плит между собой применяли однокомпонентный полиуретановый клей Kleiberit PUR Adhesive 501.0 (Kleiberit SE & Co, Вайнгартен, Германия). Прессование осуществляли в гидравлическом прессе Vario Press 30T-120/1 (Foshan City Vario Machinery Co., Ltd., Фошань, Гуандун, Китай) при температуре 23 °С, давлении 0,98 МПа (10 кг/см<sup>2</sup>) и выдержке 90 мин.

Для определения влажности плит использовали влагомер МГ4Д (ООО «СКБ Стройприбор», Челябинск, Россия). Измерение производили в режиме сканирования. Среднюю влажность устанавливали по 2 внешним слоям.

Зональное ультразвуковое сканирование плит выполняли велосиметрическим акустическим методом, основанным на определении времени прохождения ультразвукового сигнала с последующим расчетом скорости акустического сигнала [8]. Излучатель и приемник располагали друг напротив друга между взаимно параллельными лицевыми плоскостями плиты (рис. 2, а). Измерение осуществляли посредством сухого акустического контакта. Сетка измерений имела вид 25×25 с общим количеством измерений 625 шт., шагом 40 мм между смежными измерениями и перекрывала площадь в 92 % плиты. Время прохождения ультразвуковой продольной волны фиксировали в автоматическом режиме по переднему фронту сигнала с помощью ультразвуковых приборов «Пульсар 2.2» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) и Proceq Pundit PL-200 (Proceq SA, Шверценбах, Швейцария) с номинальной частотой преобразователя 60 и 54 кГц соответственно.



Рис. 2. Проведение измерений при неразрушающем контроле внутреннего состояния плит из перекрестноклееной древесины: а – велосиметрическим акустическим методом с использованием ультразвукового прибора Proceq Pundit PL-200; б – методом фиксации сопротивления сверлению устройством IML-RESI PD 400

Fig. 2. Carrying out measurements during non-destructive testing of the internal condition of cross-laminated timber panels: а – by the velocimetric acoustic method using the Proceq Pundit PL-200 ultrasonic device; б – by fixing drilling resistance using the IML-RESI PD 400 device

Для контроля внутреннего состояния плит из ДПК методом измерения сопротивления сверлению применяли прибор IML-RESI PD 400 (IML System GmbH, Вислох, Германия) со стандартным сверлом, имеющим диаметр хвостовика 1,5 мм и режущей части – 3 мм. Использовали постоянную частоту вращения тонкого бурового сверла 2500 мин<sup>-1</sup> и скорость подачи 1,5 м/мин. Просверливание производили перпендикулярно лицевой поверхности плиты в местах заложенных дефектов (рис. 2, б). В результате просверливания были получены

профили изменения сопротивления сверлению, отражающие усилия, необходимые для сверления древесины. На основании сопротивления сверлению оценивалась плотность древесины и наличие в ней внутренних дефектов [2, 20, 23].

Данные, полученные при зональном сканировании ультразвуковыми приборами и измерении сопротивления сверлению, сохранялись и обрабатывались с использованием программного обеспечения PD-Tools PRO (IML System GmbH, Вислох, Германия), Microsoft Excel (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США) и SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США) с доверительной вероятностью 95 %.

### Результаты исследования и их обсуждение

Средняя влажность древесины в плитах из ДПК варьировала от 5,7 до 8,1 % (среднее значение – 6,9 %), что соответствует влажности при кондиционировании древесины в комнатно-сухих условиях (температура воздуха – 20 °С, относительная влажность – 40 %).

Результаты зонального ультразвукового сканирования 3-слойной и 5-слойной плит из ДПК представлены на рис. 3, а статистические характеристики скоростей прохождения ультразвукового сигнала через плиты – в таблице.

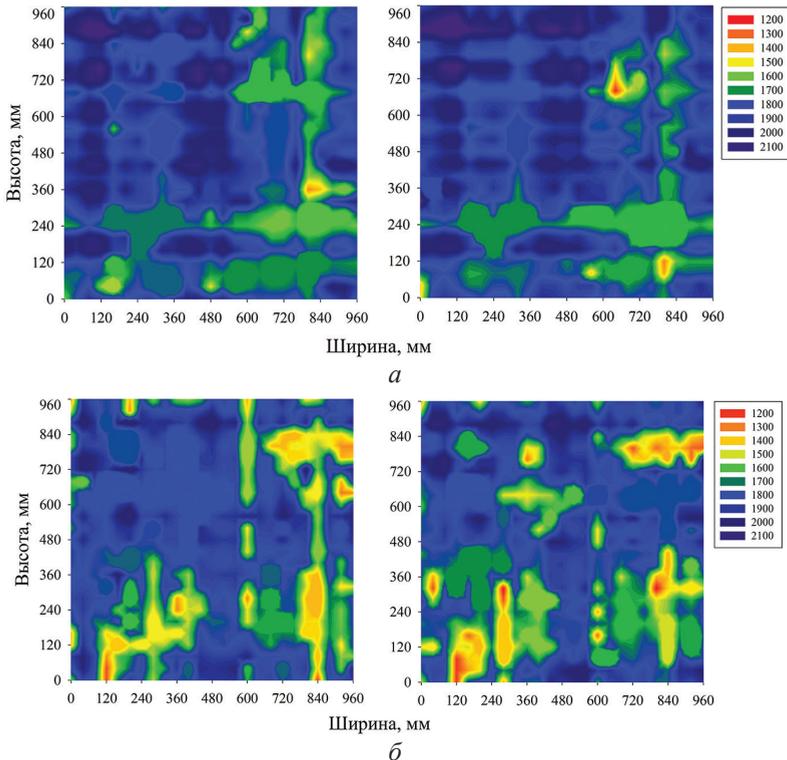


Рис. 3. Контурные графики скорости ультразвукового сигнала, полученные с помощью приборов «Пульсар 2.2» (слева) и Pundit PL-200 (справа) для плит из перекрестноклеенной древесины: *a* – 3-слойной; *b* – 5-слойной

Fig. 3. The contour graphs of ultrasonic signal velocity obtained using the “Pulsar 2.2” (left) and Pundit PL-200 (right) devices for cross-laminated timber panels: *a* – 3-layer; *b* – 5-layer

Полученные выборки скоростей распространения ультразвукового сигнала не подчинялись нормальному закону распределения случайных величин

( $A_{ст}$ ,  $E_{ст}$ ). На основании попарного сравнения медиан по U-критерию Манна–Уитни и законов распределений скоростей ультразвукового сигнала, зафиксированного приборами «Пульсар 2.2» и Pundit PL-200 для плит толщиной 120 и 200 мм, и по критерию Колмогорова–Смирнова для плит толщиной 120 мм установлено отсутствие статистически значимых различий между выборками. Это подтверждает равную точность двух использованных приборов. Визуально графики распределения скоростей ультразвуковых сигналов схожи и дают одинаковую информацию о наличии дефектов в плитах.

### Вариабельность скорости ультразвукового сигнала в плитах из перекрестноклееной древесины, м/с

#### The variability of ultrasonic signal velocity in cross-laminated timber panels, m/s

Используемый ультразвуковой прибор	Толщина плиты, мм	$M \pm m$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	$S_x$	CV	$A_{ст}$	$E_{ст}$
Пульсар 2.2	120	1839,3±6,5	1217	2277	163,0	8,86	-9,88	10,37
	200	1731,3±7,8	1213	2081	194,2	11,21	-8,32	-1,56
Pundit PL-200	120	1825,7±6,7	945	2272	168,4	9,22	-10,78	14,04
	200	1729,1±7,9	1026	2103	198,5	11,48	-10,47	2,68

Примечание:  $M \pm m$  – среднее значение и его ошибка;  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – минимальное и максимальное значения соответственно;  $S_x$  – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации;  $A_{ст}$  – стандартизованная асимметрия;  $E_{ст}$  – стандартизованный эксцесс.

Регрессионный анализ показал умеренную взаимосвязь ( $R^2 = 0,61$  и  $R^2 = 0,48$ ) между скоростями ультразвукового сигнала применяемых приборов (рис. 4).

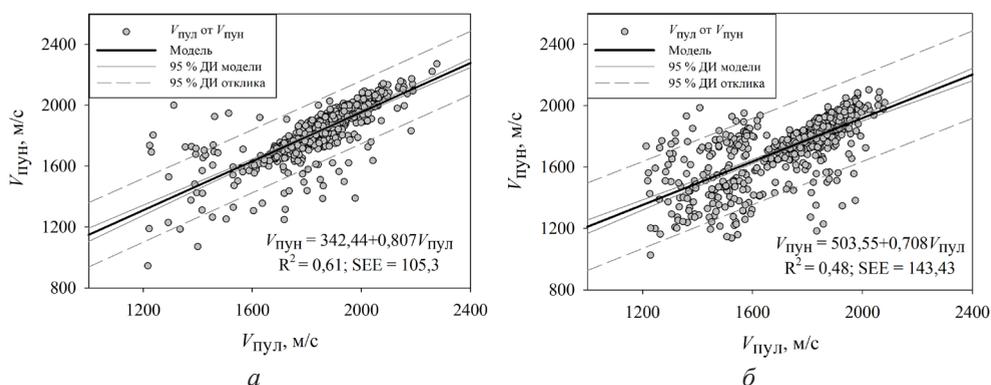


Рис. 4. Взаимосвязь между скоростью ультразвукового сигнала, полученного с помощью приборов «Пульсар 2.2» ( $V_{\text{Пул}}$ ) и Pundit PL-200 ( $V_{\text{Пун}}$ ) для плит из перекрестноклееной древесины: *a* – 3-слойная; *б* – 5-слойная ( $R^2$  – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации; ДИ – доверительный интервал, модель и ее коэффициенты значимы)

Fig. 4. The relationship between the speed of the ultrasonic signal obtained using the “Pulsar 2.2” ( $V_{\text{Пул}}$ ) and Pundit PL-200 ( $V_{\text{Пун}}$ ) devices for cross-laminated timber panels: *a* – 3-layer; *б* – 5-layer ( $R^2$  – coefficient of determination; SEE – standard error of the estimate; ДИ – confidence interval, the model and its coefficients are significant)

В 3-слойной плите наблюдается отсутствие дефектов при скорости акустического сигнала от 1400 до 2200 м/с. При этом на участках плиты, где были заложены дефекты всех трех видов, скорость ультразвукового сигнала снижа-

ется при ее вариации от 1000 до 1400 м/с. В 5-слойной плите тенденция уменьшения скорости ультразвукового сигнала в местах с внутренней полостью и отсутствием клеевой прослойки схожая. При этом не отмечается четкая зона падения скорости в плите, где в центральном слое использовались заготовки, пораженные пестрой гнилью. Вероятно, это связано с тем, что доля ширины заготовки слоя, пораженной гнилью, в 5-слойной плите значительно меньше по сравнению с 3-слойной, что незначительно влияет на скорость прохождения ультразвукового сигнала. Результаты ультразвукового зонального сканирования согласуются с ранее полученными данными [8, 18].

Стоит отметить, что по скорости акустического сигнала можно определить только вероятное наличие дефекта.

Результаты применения метода измерения сопротивления сверлению 3- и 5-слойной плит представлены на рис. 5. Данные профили получены на участках без внутренних дефектов 1, с полостью в центральном слое плиты 2 и на участке 3, где в центральном слое была использована заготовка с пестрой гнилью.

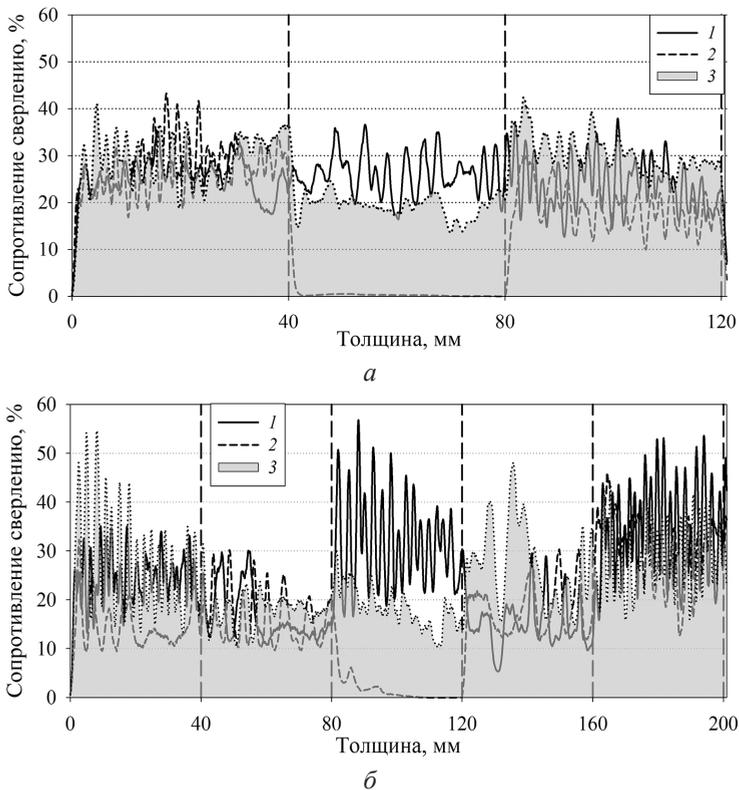


Рис. 5. Профили сопротивления сверлению плит из перекрестноклееной древесины: *a* – 3-слойной; *б* – 5-слойной

Fig. 5. The drilling resistance profiles of cross-laminated timber panels: *a* – 3-layer; *б* – 5-layer

На профилях сопротивления сверлению для 3- и 5-слойной плит из ДПК зафиксировано снижение показателя в центральном слое. Так, для участка плиты без дефектов профиль не имеет резких изменений величины, она только варьирует в зависимости от прохождения сверла через раннюю и позднюю древесину по всей ширине изделия, что говорит об отсутствии дефектов. На профиле с полостью отчетливо заметно падение сопротивления сверлению до

0, это свидетельствует о наличии полости. На профиле с заготовкой, пораженной гнилью, наблюдается уменьшение показателя в среднем на 30 %, что отражает пониженную плотность древесины на данном участке [2, 13, 23, 24], не соответствующую плотности древесины сосны, указывая на присутствие гнили. Наличие и отсутствие клеевой прослойки между слоями плиты из ДПК не отражалось на всех профилях сопротивления сверлению. Это связано с разрешающей способностью данного метода исследований, толщиной клевого шва и его прочностью, ограничивая применение метода для указанных целей.

### Заключение

Велосиметрический акустический метод с использованием ультразвуковых приборов и метод измерения сопротивления сверлению могут быть рекомендованы в качестве основных для оценки внутренних дефектов в плитах из перекрестноклееной древесины, при этом акустический метод позволяет выявлять возможные места расположения дефектов, а сверление тонкими буровыми сверлами – фактические размеры, границы размещения и типы дефектов. Вместе с тем метод измерения сопротивления сверлению не дает возможность установить наличие или отсутствие клевого шва в плитах из перекрестноклееной древесины. Зональное сканирование велосиметрическим методом и установление сопротивления сверлению позволяют наглядно представить наличие внутренних дефектов в виде профилей сопротивления сверлению и контурных графиков скоростей.

Информативность велосиметрического акустического метода выше для плит меньшей толщины, а граничной скоростью ультразвуковой волны, характеризующей наличие внутреннего дефекта, может являться скорость в 1400 м/с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бирман А.Р., Локишанов Б.М., Соколова В.А., Сергеевичев А.В., Орлов В.В., Бачериков В.И., Фролов И.С. Методы определения участков с ядровой гнилью для обеспечения рационального раскроя хлыстов // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 2(34). С. 116–120.

Birman A.R., Lokshyanov B.M., Sokolova V.A., Sergeevichev A.V., Orlov V.V., Bacherikov V.I., Frolov I.S. Methods for Determining Core Rot Areas to Ensure Rational Cutting of Whips. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2017, no. 2(34), pp. 116–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-2-116-120>

2. Королев А.С., Шаранов Е.С., Попов В.А. Оценка внутреннего состояния древесины в балках перекрытий методом измерения сопротивления сверлению // Вестн. гражданск. инженеров. 2023. № 5(100). С. 21–30.

Korolev A.S., Sharapov E.S., Popov V.A. Assessment of Internal Condition of Wood in Inter-Floor Covering Beams by Drilling Resistance Measurement Method. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov* = Bulletin of Civil Engineers, 2023, no. 5(100), pp. 21–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-21-30>

3. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Теппов А.В., Ананьева Н.И., Семешкур С.О., Бакшиева М.А. Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 76–84.

Chubinsky A.N., Tambi A.A., Tepпов A.V., Anan'eva N.I., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A. Physical Non-Destructive Testing Methods and Evaluation of the Structure of Wood-Based Materials. *Defektoskopiya* = Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, no. 11, pp. 76–84. (In Russ.).

4. Чубинский А.Н., Тамби А.А., Федяев А.А., Федяева Н.Ю., Кульков А.М. Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2(26). С. 152–158.

Chubinsky A.N., Tambi A.A., Fedyayev A.A., Fedyayeva N.Yu., Kulkov A.M. Using Physical Methods to Control Wood Structure and Properties. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies, 2015, no. 2(26), pp. 152–158. (In Russ.).

5. Шаранов Е.С. Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2020. 340 с.

Sharapov E.S. *Improvement of Methods and Means of Quasi-non-Destructive Testing of Physical and Mechanical Properties of Wood and Wood-Based Materials*: Dr. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2020. 340 p. (In Russ.).

6. Brunetti M., Aminti G., Vicario M., Nocetti M. Density Estimation by Drilling Resistance Technique to Determine the Dynamic Modulus of Elasticity of Wooden Members in Historic Structures. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 6, art. no. 1107.

<https://doi.org/10.3390/f14061107>

7. Ceraldi C., Mormone V., Russo Ermolli E. Resistographic Inspection of Ancient Timber Structures for the Evaluation of Mechanical Characteristics. *Materials and Structures*, 2001, vol. 34, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1007/BF02482201>

8. Concu G., Fragiaco M., Trulli N., Valdés M. Non-Destructive Assessment of Gluing in Cross-Laminated Timber Panels. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2017, vol. 226, pp. 559–569 <https://doi.org/10.2495/SDP170491>

9. Dietsch P., Tannert T. Assessing the Integrity of Glued-Laminated Timber Elements. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 101, part 2, pp. 1259–1270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064>

10. Faircloth A., Brancheriau L., Karampour H., Kumar C. Evaluation of Full-Sized and Thick Cross-Laminated Timber Using In-Line Non-Destructive Techniques. *Wood Material Science and Engineering*, 2023, vol. 19, iss. 3, pp. 660–673. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2286622>

11. Gaspar F., Cruz H., Gomes A. Evaluation of Glue Line Shear Strength of Laminated Timber Structures Using Block and Core Type Specimens. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, pp. 413–425.

<https://doi.org/10.1007/s00107-017-1217-4>

12. Gsell D., Feltrin G., Schubert S., Steiger R., Motavalli M.M. Cross-Laminated Timber Plates: Evaluation and Verification of Homogenized Elastic Properties. *Journal of Structural Engineering*, 2007, vol. 133, no. 1, pp. 132–138.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:1\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(132))

13. Imposa S., Mele G., Corrao M., Coco G., Battaglia G. Characterization of Decay in the Wooden Roof of the S. Agata Church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by Means of Sonic Tomography and Resistograph Penetration Tests. *International Journal of Architectural Heritage*, 2014, vol. 8, iss. 2, pp. 213–223. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.685924>

14. Kloiber M., Frankeová D., Slížková Z., Kunecký J. Repair of Old Timber Log House Using Cavity Filling with Compatible Natural Materials. *Buildings*, 2023, vol. 13, no. 2, art. no. 550. <https://doi.org/10.3390/buildings13020550>

15. Kloiber M., Tippner J., Hrivnák J. Mechanical Properties of Wood Examined by Semi-Destructive Devices. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 199–212. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0055-z>

16. Machek L., Militz H., Sierra-Alvarez R. The Use of an Acoustic Technique to Assess Wood Decay in Laboratory Soil-Bed Tests. *Wood Science and Technology*, 2001, vol. 34, pp. 467–472. <https://doi.org/10.1007/s002260000070>

17. McGovern M., Senalik A., Chen G., Beall F.C., Reis H. Effect of Decay on Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements in Wood. *Proceedings of SPIE – The Interna-*

*tional Society for Optical Engineering: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2011, vol. 7981, art. no. 79810N.

<https://doi.org/10.1117/12.879057>

18. Moya R., Tenorio C., Muñoz F. Ultrasound Velocity Mapping to Evaluate Gluing Quality in CLT Panels from Plantation Wood Species. *Wood Science and Technology*, 2021, vol. 55, pp. 681–696. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01273-x>

19. Nocetti M., Mannucci M., Brunetti M. Automatic Assessment of Insect Degradation Depth in Structural Solid Wood Elements by Drilling Resistance Measurements. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 366, art. no. 130273.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130273>

20. Oliveira J.T. da S., Wang X., Vidaurre G.B. Assessing Specific Gravity of Young *Eucalyptus* Plantation Trees Using a Resistance Drilling Technique. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, no. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058>

21. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 12, art. no. 1734. <https://doi.org/10.3390/f12121734>

22. Park C.Y., Kim S.J., Lee J.J. Evaluation of Specific Gravity in Post Member by Drilling Resistance Test. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2006, vol. 34(2), pp. 1–9.

23. Rinn F. Basics of Micro-Resistance Drilling for Timber Inspection. *Holztechnologie*, 2012, vol. 53, iss. 3, pp. 24–29.

24. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. *General technical report FPL, GTR-70*, 1994. 39 p.

<https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-70>

25. Sandoz J.L., Benoit Y., Demay L. Wood Testing Using Acousto-Ultrasonic. *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Sopron, University of Western Hungary, 2000, pp. 97–104.

26. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Prediction of Modulus of Elasticity in Static Bending and Density of Wood at Different Moisture Contents and Feed Rates by Drilling Resistance Measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, vol. 77, pp. 833–842. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2>

27. Steiger R., Gülzow A., Gsell D. Non Destructive Evaluation of Elastic Material Properties of Cross-Laminated Timber (CLT). *Proceedings of the Conference COST E53*. The Netherlands, Delft, 2008, pp. 29–30.

28. Zhang L., Tiemann A., Zhang T., Gauthier T., Hsu K., Mahamid M., Moniruzzaman P.K., Ozevin D. Nondestructive Assessment of Cross-Laminated Timber Using Non-Contact Transverse Vibration and Ultrasonic Testing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021, vol. 79, pp. 335–347. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01644-4>

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

Review article

УДК 630.90,338.012

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-154-171

## Analysis of the Timber Industry Complex of Forest-Rich Countries

**Olga P. Sushko**<sup>✉</sup>, *Doctor of Economics, Prof.*; ResearcherID: [F-4750-2019](https://orcid.org/0000-0003-0865-6621),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0865-6621>

**Marina V. Efimova**, *Candidate of Economics, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [ACH-7887-2022](https://orcid.org/0000-0002-1340-8406),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1340-8406>

Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny per., 36, Moscow, 115054, Russian Federation; osushko@mail.ru<sup>✉</sup>, Mishagina.MV@rea.ru

*Received on September 17, 2024 / Approved after reviewing on December 11, 2024 / Accepted on December 14, 2024*

**Abstract.** The article presents the results of a comparative analysis of the production of forest products in the world at the present stage. International trade and production of forest products demonstrates consistent growth. Global export volumes are showing steady annual growth rate of 1.8 % compared to the preceding decade. Forecasts indicate that this upward trend is expected to continue, with even stronger growth expected in 2030. In 2022, global forest production remained generally stable compared to the previous year. Nevertheless, a decline was recorded in some product categories, primarily due to a decrease in production and exports from Russia. The year 2023 has become just as difficult for the global timber industry complex. Despite the stability of the balance of supply and demand for forest products on the world market, there are obvious changes that will become development trends. The analysis shows that forest-rich donor countries (Brazil, Canada, Russia) export timber and lumber to recipient countries with high domestic demand for timber (China, India, the Middle East and Central Asia). Consequently, a state's forest resource stock should not be considered as the sole indicator of the success and progress of its forestry sector. Several major forest product producing countries, despite lacking access to their own timber reserves, have a developed woodworking industry, which is renowned for producing high-quality products from imported raw materials. Such a strategy of competition in the timber market has been adopted in some Asian countries.

**Keywords:** timber industry complex, global production of forest products, export of forest products, dynamics of forest products production

**Acknowledgements:** The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 24-28-01250).

**For citation:** Sushko O.P., Efimova M.V. Analysis of the Timber Industry Complex of Forest-Rich Countries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 154–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-154-171>

Обзорная статья

## Анализ лесного комплекса лесобеспеченных стран

**О.П. Сушко**<sup>✉</sup>, *д-р экон. наук, проф.*; ResearcherID: [F-4750-2019](https://orcid.org/0000-0003-0865-6621),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0865-6621>

**М.В. Ефимова**, *канд. экон. наук, доц.*; ResearcherID: [ACH-7887-2022](https://orcid.org/0000-0002-1340-8406),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1340-8406>

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный пер., д. 36, Москва, Россия, 115054; osushko@mail.ru<sup>✉</sup>, Mishagina.MV@rea.ru

Поступила в редакцию 17.09.24 / Одобрена после рецензирования 11.12.24 / Принята к печати 14.12.24

**Аннотация.** Представлены результаты сравнительного анализа производства лесной продукции в мире на современном этапе. Международная торговля и выпуск лесной продукции демонстрируют устойчивый рост: объемы мирового экспорта ежегодно увеличиваются на 1,8 % по сравнению с предыдущим десятилетием. Прогнозы указывают на то, что эта тенденция сохранится и в 2030 г. рост будет еще более уверенным. В 2022 г. мировой объем изготовления лесной продукции в целом оставался на стабильном уровне по сравнению с предыдущим годом. Тем не менее в некоторых категориях был зафиксирован спад, что в первую очередь связано с уменьшением объемов производства в России и экспорта из нашей страны. 2023 г. стал таким же трудным для мирового лесного комплекса. При всей стабильности баланса спроса и предложения лесной продукции на мировом рынке очевидны изменения, которые станут тенденциями развития. Анализ показывает, что богатые лесами страны-доноры (Бразилия, Канада, Россия) экспортируют древесину и пиломатериалы в страны-получатели с высоким внутренним спросом на древесину (Китай, Индия, Ближний Восток и Центральная Азия). Следовательно, запасы лесных ресурсов в государстве неверно рассматривать как единственный показатель успеха и прогресса его лесного сектора. Нескольким крупным стран-производителям лесной продукции, несмотря на отсутствие доступа к собственным запасам древесины, обладают развитой деревообрабатывающей промышленностью, которая славится высококачественной продукцией из импортного сырья. Такая стратегия конкуренции на рынке древесины была принята в некоторых странах Азии.

**Ключевые слова:** лесной комплекс, мировое производство лесной продукции, экспорт лесной продукции, динамика производства лесной продукции

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 24-28-01250).

**Для цитирования:** Sushko O.P., Efimova M.V. Analysis of the Timber Industry Complex of Forest-Rich Countries // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 154–171. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-154-171>

Projections from the global timber industry complex development model indicate a sustained rise in both the production and consumption of forest products until the year 2050. This positive forecast is also confirmed by the fact that, despite the halt in development or stagnation in some industries over the past decade, the timber industry complex has been and remains stable. Moreover, it is showing rapid recovery after economic crises. The world forecasts of leading analytical institutions also present prospects for the production of new types of forest products, which indicates the existing potential [9, 15–17, 21, 25]. Positive trends and development forecasts are largely due to population growth and human well-being, which is especially noticeable for developing countries. The growth in the volume and quality of consumption leads to a change in the structure of forest product consumption.

Over the past few decades, a discernible change in global demand for forest products has emerged, with Southeast Asia and South America experiencing particularly noticeable shifts which are intrinsically linked to significant changes in lifestyles and a considerable enhancement in both the variety and caliber of consumer prod-

ucts and services. Economic growth, characterized by rising national and individual incomes, strengthens consumer purchasing power. Population growth drives an increase in demand for products and services. Data from Oxford Economics indicates that global population has been growing at an average annual rate of 1.2 % between 2008 and 2022. Over this period, the economy experienced an average yearly growth in GDP per capita of 1.5 %. Projections from Oxford Economics suggest a slightly higher average annual growth rate of 1.8 % for individual income between 2019 and 2028 [15, 16, 19, 20].

Due to the significant size and value of Russia's forested areas, numerous research projects are actively investigating the functioning of these intricate ecosystems [29, 36–46]. E.D. Ivantsova has examined Canada's experience in organizing the timber industry complex and have identified differences in operational conditions compared to Russia [22]. N.V. Lukina [27, 28], D.I. Ushkalova [47] and other researchers [48–51] are studying the diverse aspects of the state of forest ecosystems. A study by V.V. Tsvirkov, L.I. Kasko and M.N. Karashchuk, devoted to the analysis of forestry management systems in North America, the European Union and the CIS countries, has revealed the absence of centralized management structures in most of the studied countries [46]. Research by Russian and foreign scientists confirms that the effectiveness of the development of timber industry complex is largely due to the introduction of an intensive model of forest management, which is successfully applied in countries with large amounts of forest resources. Researcher N.E. Antonova has conducted a study examining the forestry practices of prominent forest-managing nations, including Canada, the United States, Finland, Sweden, Japan, and Germany [2]. Researchers E.I. Shchastyantseva and L.A. Suvorova have examined Finland's and Sweden's practices in forest resource management. Based on the studied experience, a model of forest management has been created for the development of timber industry complex of the Kirov Region [40]. M.A. Bulgakova and P.V. Samolysov have conducted a research on timber industry complex management methods in Canada and have developed strategies for forest management They have highlighted the forest policy tools employed and identified different types of forest users that influence the establishment of a sustainable forestry framework [1, 8]. The work by D.N. Savenya examines the forest policies of prominent foreign countries such as Canada, USA, Finland, and Sweden [37]. These nations, including Russia, Canada, the United States, Germany, and Brazil, share commonalities in their governmental systems [11, 23, 24, 34, 35]. N.M. Shmatkov and E.G. Kulikova have investigated the international forest policy [41]. S. O. Medvedev, Y.F. Chupina, T.G. Ryabova and M.A. Zyryanov have presented foreign experience in the development of timber processing enterprises [29]. Foreign researchers have been actively discussing climate change and adaptation of forests to changes in recent years [3, 6, 32]. A significant part of the world's scientific works and programs are devoted to forest biodiversity [7–9, 26, 30, 31, 33].

According to leading analytical agencies, for the period since 1990 till 2020, forest areas on the planet have been decreasing. Thus, the reduction over 30 years has been from 32.5 to 30.8 %. But at the same time, there is a positive point: since 2010 till 2020, the average rate of forest loss has been slightly lower and amounted to 4.7 mln ha per year. Thus, over the past decade, there has been a significant decrease in the forest area – by 40 % compared to the previous decade. This amounts to 7.8 mln ha annually. It should be emphasized that the degree of forest degradation varies

significantly depending on the region and country (Fig. 1). Thus, China is increasing forest areas due to the successful implementation of the national program. On the contrary, countries such as Brazil and New Zealand are contributing to deforestation with large-scale logging. The maximum absolute forest growth over the recent period has been observed in Asia, Oceania and Europe. For a considerable period, Russia has been experiencing a continuous decrease in forested regions. The reduction of forest resources predominantly takes place in areas housing major timber companies. Therefore, the forested area in central and northwestern Russia has decreased significantly. There is also a low productivity of logging in the richly wooded regions of Russia, being the North, as well as West and East Siberia. More than 62 % of the planet’s forest resources are located in 5 countries (Fig. 2).

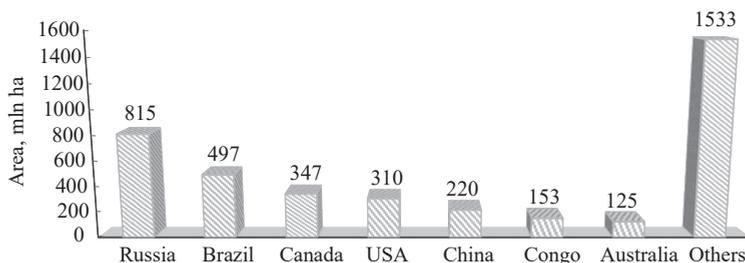


Fig. 1. The global forest area for 2022

Half of the forests and forest resources are located in the northern part of the planet (Russia, Canada, America, Sweden, Finland) [9, 10]. The second half is located in the southern forest belt covering 3 zones: Southeast Asia, the Amazon River area and the Congo River basin. The main tropical forest resources are concentrated in Brazil, China, Congo, Australia, Indonesia, Sudan and India. Eurasia possesses a significant portion of the world’s forests, accounting for almost 40 %, and is distinguished by its high-quality wood species diversity. Conversely, Australia exhibits a relatively low level of forest coverage. South America leads globally in terms of forest cover density, measured as the proportion of land area covered by forests.

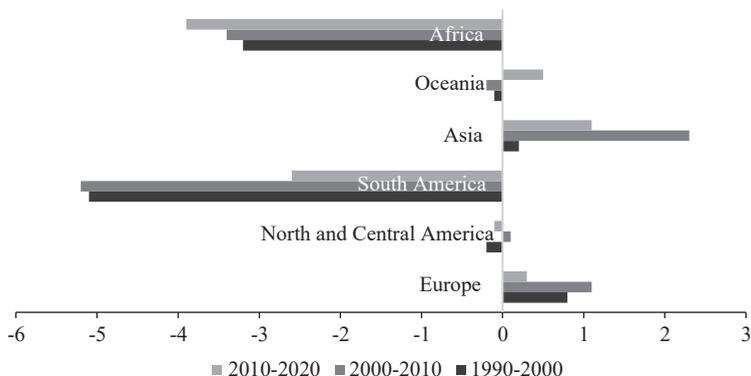


Fig. 2. The change in forest area by macroregions (mln ha/year)

5 countries collectively contain over 50 % of the world’s forests. Russia has the most extensive forest coverage with Brazil, Canada, the United States, and China following closely behind, each possessing significant forested areas. 7 countries (Fig. 1) account for more than 62 % of the world’s forests [9, 10, 14, 16].

It is important to understand that the availability of forest resources does not guarantee countries innovative development of the timber industry complex and competitiveness in the global market. Furthermore, it is important to consider the global trends in the forest products market. One of them is related to the stabilization of the production of traditional timber, which is due to the life cycle. The second trend is determined by the constant increase in the consumption of forest products due to the growth of the world's population. These trends are the drivers of changes in the global forest products market, which is undergoing transformation under the influence of technological progress and environmental programs. The global timber market has undergone significant changes in volume and composition of product segments over a prolonged period. At the same time, the production technology and the quality characteristics of forest products are being improved. The international timber market is undergoing a gradual transformation driven by the integration of novel biotechnologies and the development of innovative forest-derived products such as nanocellulose and composite materials. Another important activator of the global development of the timber market was the introduction of anti-Russian sanctions in 2022, which radically changed trade flows [3–5]. The Russian timber industry complex has been forced to form new external supply channels for forest products. At the same time, the supply of export forest products to Asia and the CIS countries has increased significantly. In the context of the withdrawal of foreign companies from the Russian timber market, the domestic sector is experiencing significant transformations. This process is associated with a number of challenges, in particular, the growth of transport, logistics and customs costs. Additional difficulties are caused by insufficient transport infrastructure to ensure uninterrupted supplies. Nevertheless, the expansion of the Asian market has created favorable conditions for an increase in Russian timber exports. Concurrently, the evolving landscape of export-import logistics in Asia has resulted in a scarcity of timber resources within the European market. However, despite efforts to diversify exports, enterprises are having difficulty establishing links with foreign buyers, as many of them are afraid of falling under secondary sanctions. This leads to a decrease in supply volumes and, as a result, a decrease in income from trade. In addition, the domestic market is also under pressure due to falling export volumes. A decrease in demand for wood from the outside creates an oversupply within the country, which in turn leads to a drop in prices. These changes have a negative impact on the financial condition of companies operating in the forest industry and threaten jobs in regions that depend on the forest industry.

The interplay of contrasting trends will reshape competitive dynamics within the global forestry sector, ultimately leading to the emergence of a novel international framework for forest management both globally and regionally. With increasing trade restrictions, the geographical structure of forest product trade flows is changing. Markets that have previously been secondary are starting to gain importance. China, as well as East Asian and African countries have become new centers of attention for Russia. The changes will continue and will have a significant impact on the dynamics and structure of the global timber market, creating new opportunities and challenges for both the states and private enterprises seeking to adapt to new conditions. One of the key aspects of these changes will be not only the redistribution of resources, but also the formation of new principles of sustainable forest management. The states, in an effort to protect their forest wealth, may introduce stricter rules,

which in turn will entail the need for adaptation for businesses. Private enterprises, aware of the environmental risks, can begin to introduce innovative technologies that help minimize the negative impact on the environment. Cooperation between public and private initiatives will play an important role in this process, which will create effective models for managing forest resources. The development of carbon credits, support programs for sustainable forest management practices and international agreements on forest protection will be the main tools contributing to an effective response to new challenges.

To ascertain the diverse trajectories of global forestry development in recent times and derive insights into the production and export of conventional forest products, a comprehensive analysis has been deemed necessary. It should be noted that over the last 5-year period, the global production of forest products has generally been stable (Table 1), compared with a longer period when there was an increase in production (Table 2, fig. 3). While the production of most types of forest products in 2022 remained at the same level compared to the previous year, there was a decrease in some types due to a reduction in Russian production and exports, as noted above. Over the last period, world exports, by analogy with production, has been gradually growing (about 1.5–1.8 % per year) [15].

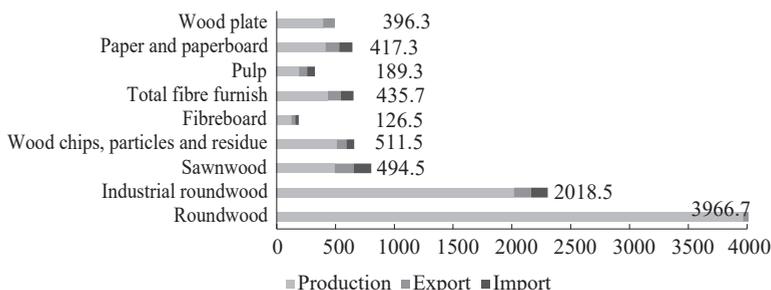


Fig. 3. Production, export and import of forest products in the world for 2022, mln ton [18]

Over the past 5 years, global logging volumes have increased slightly, amounting to 4,050 mln m<sup>3</sup> compared to 3,950 mln m<sup>3</sup> previously, but it is important to consider this increase in the context of long-term historical trends (Fig. 4). In 2021, the top loggers were the USA (11 %), India and China (9 % each), Brazil (6.8 %), Russia (5.5 %), and Canada (3.4 %). The leading exporters of industrial wood on the global market differ from the top producers. New Zealand (15 %), Czech Republic (12 %), Russia (11 %), Germany (8 %), USA (6 %), and Canada (5 %) maintain the main export positions for industrial wood.

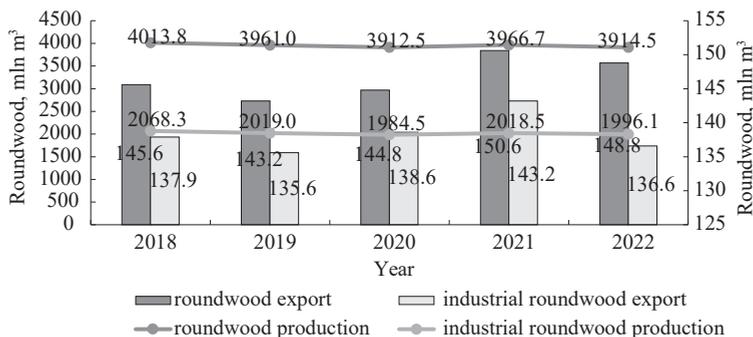


Fig. 4. Production and export of roundwood in kind [18]

Analysis of international trade data reveals that the production of forest products is heavily geared towards exports. Lumber exports constitute a significant portion, representing one-third of total national production. Additionally, a substantial proportion, ranging from 25 to 35 %, of slab wood and plywood produced by these countries are supplied to the global market. Similar shares of pulp, paper and cardboard produced are also supplied to the global market. Consequently, the leading countries producing forest products depend on the conjuncture of the global timber market. The global economic and political transformations taking place in various countries have, to one degree or another, an impact on the parameters of the equilibrium of the global forest products market. The sanctions regime introduced in 2022 due to the difficult geopolitical situation significantly affects the volume of production and price dynamics of timber. Instability in the global socio-economic environment creates uncertainty about the results of production activities and foreign economic transactions with forest products on the global market in the period from 2022 to 2024 (Table 1). At the same time, despite minor changes in global production volumes of forest products, there is a decrease in exports of many of its types. In 2022, exports of round and business timber decreased by 23 and 25 %, respectively, compared to the previous period. Lumber exports fell by 10 % in 2022. A slightly smaller decrease in exports occurred for plywood and slab materials – by 5–8 %. There is also a decrease in exports of paper and cardboard – by 4 %. In 2023 a decrease in production and exports is observed for all types of forest products.

Table 1

## Global production and export of forest products [18]

Products	Production	Value of imports, \$ mln	Imports, thsnd natural units	Value of exports, \$ mln	Exports, thsnd natural units	Share of exports from production, %
<i>Roundwood, mln m<sup>3</sup></i>						
2023	3,885.7	15.2	108.2	13.2	103.4	2.6
2022	3,983.3	19.3	124.1	15.4	116.2	2.9
Change in 2022/2021 (%)	100.4	92.4	83.9	90.2	77.2	-0.9
<i>Wood fuel, mln m<sup>3</sup></i>						
2023	1,961.1	0.6	5.5	0.7	6.8	0.34
2022	1,967.3	0.6	5.5	0.7	7.6	0.39
Change in 2022/2021 (%)	101.0	135.4	102.1	121.7	102.6	+0.01
<i>Industrial roundwood, mln m<sup>3</sup></i>						
2023	1,924.6	14.5	102.6	12.5	96.6	4.9
2022	2,016.0	18.7	118.6	14.7	108.6	5.4
Change in 2022/2021 (%)	99.9	91.5	83.2	89.0	75.8	-1.5
<i>Wood chips, particles and residues, mln m<sup>3</sup></i>						
2023	252,403.0	6,895.0	55,278.0	5,603.0	67,436.0	26.7
2022	509.7	8.3	69.9	6.5	83.1	16.3
Change in 2022/2021 (%)	99.7	142.7	102.7	130.4	103.5	-0.6
<i>Sawnwood, mln m<sup>3</sup></i>						
2023	444.6	38.3	127.2	37.7	5.9	1.3

End of Table 1

Products	Production	Value of imports, \$ mln	Imports, thsnd natural units	Value of exports, \$ mln	Exports, thsnd natural units	Share of exports from production, %
2022	481.3	52.5	137.3	51.5	143.1	29.7
Change in 2022/2021 (%)	97.3	96.2	91.8	95.7	89.7	-0.6
<i>Wood-based panels, mln m<sup>3</sup></i>						
2023	354.1	40.1	85.1	39.4	89.1	25.3
2022	375.3	45.3	92.9	45.4	94.1	25.1
Change in 2022/2021 (%)	94.7	104.8	91.5	103.4	94.7	-0.7
<i>Fibreboard, thsnd m<sup>3</sup></i>						
2023	113.2	11.2	22.7	11.1	24.7	21.2
2022	117.8	12.9	27.9	12.7	28.5	117.8
Change in 2022/2021 (%)	93.2	108.9	91.5	109.0	93.9	+0.2
<i>Pulp for paper, mln tons</i>						
2023	194.7	45.8	65.3	39.5	65.6	33.8
2022	198.6	50.5	62.7	42.8	64.1	32.3
Change in 2022/2021 (%)	105.5	123.8	102.7	115.3	102.1	-1.0
<i>Wood pulp, mln tons</i>						
2023	192.6	51.5	71.3	44.5	71.6	37.3
2022	195.8	55.9	68.2	47.8	69.5	35.5
Change in 2022/2021 (%)	103.4	121.8	101.5	115.2	101.6	-0.7
<i>Paper and paperboard, mln tons</i>						
2023	400.8	106.1	104.1	102.0	103.6	25.7
2022	414.1	121.8	111.5	119.1	111.4	26.9
Change in 2022/2021 (%)	99.0	117.7	97.6	114.3	96.4	-0.7

Globally, lumber production has remained relatively stable over the last 5 years, fluctuating between 485 and 510 mln m<sup>3</sup>. Concurrently, exports have ranged from 155 to 200 mln m<sup>3</sup> (Table 2). Canada dominates the export market, accounting for 28 % of total exports. Following Canada are Sweden (12 %), Germany (11 %), Finland (9 %), and the United States (6 %). The global production of wood slab materials is steadily increasing from 2017 to 2022, with the current volume exceeding 400 million m<sup>3</sup>. China accounts for over 45 % of the total production, followed by the USA (9 %) and Russia (4 %). In 2022, the volume of wood slab exports surpassed 100 m<sup>3</sup>, with China leading the way (14 %), followed by Canada (8 %), Germany and Thailand (7 % each), Russia (6 %), and Brazil (4.5 %). Europe and the CIS countries continue to have a trade surplus in wood slabs, while North America faces a deficit.

The growth in the production of forest products is restrained by a decrease in the production of pulp and paper and cardboard products. Since 2017, there has been a downward trend in global pulp production, with the exception of a short-term increase in 2021 caused by the easing of pandemic restrictions. In 2022, production volumes may reach less than 190 million tons. The United States accounts for a quarter of the total pulp volume, making it the largest producer. Other leading pulp

producers include Brazil (12 %), China (10 %), Canada (7.5 %), Sweden (6 %), and Finland (6 %). Approximately one-third of the pulp produced is sold on the global market, which is heavily concentrated. 3 countries (Brazil, Canada, and the United States) account for 50 % of the market, with Brazil supplying a quarter of the export pulp, Canada contributing 12.8 %, and the United States providing 11 %. Other significant exporters include Indonesia (8.1 %), Finland (6.7 %), Chile (6 %), and Sweden (6 %). The expansion of global pulp production is ongoing as new bleached hardwood kraft pulp production facilities are being built and commissioned in Asia and South America. However, these facilities are encountering internal challenges and external resistance from traditional producers and exporters.

The paper and cardboard industry experienced a downturn beginning in 2017, with the exception of a rebound in 2021 following the COVID-19 pandemic. The reduction in the use of forest products can be linked to the increasing reliance on digital technologies within the society. Global production of paper and cardboard amounted to 405 million tons last year. At the same time, China accounts for a third of the volume of paper and cardboard production. Japan and Germany are in the second and third places with the shares of 5.7 % and 5.4 %, respectively. India has a smaller share – 4 %. Approximately 30 % of the paper and cardboard produced is exported to the international market. The leading exporters are Germany (13 %), the USA (9 %), Sweden (8.1 %), Finland (7.3 %), Canada (5.5 %), China (5 %), and Indonesia (4.5 %). Russia exports around 3 % of paper and cardboard.

Table 2

## Production of forest products [18]

Country	Year	Round-wood, thsnd m <sup>3</sup>	Industrial round-wood, thsnd m <sup>3</sup>	Sawlogs and veneer logs, thsnd m <sup>3</sup>	Wood chips, particles and residues, thsnd m <sup>3</sup>	Sawn-wood, thsnd m <sup>3</sup>	Fibre-board, thsnd m <sup>3</sup>	Pulp for paper, thsnd tons	Paper and paper-board, thsnd tons
Australia	2000	31,181	24,407	11,442	18,045	4,093	0,621	1,028	2,836
	2010	30,414	25,561	12,155	16,273	5,079	0,598	1,304	3,203
	2020	33,354	29,481	12,569	17,435	4,377	0,530	1,395	3,061
	2022	29,898	25,983	10,660	15,314	4,350	0,595	1,399	3,013
	2022 share in global production, %	0.75	1.29	0.93	3.00	0.90	0.50	0.70	0.73
Brazil	2000	235,402	102,994	49,290	0	21,300	1,001	7,341	7,116
	2010	235,432	128,400	50,574	18,782	17,450	3,416	14,164	9,978
	2020	276,865	154,720	57,782	30,928	10,002	6,230	21,016	10,184
	2022	303,898	170,681	61,245	30,928	10,001	5,480	25,032	11,040
	2022 share in global production, %	7.63	8.47	5.36	6.07	2.08	4.65	12.61	2.67
Canada	2000	201,845	198,918	166,654	85,646	50,465	1,833	26,495	20,921
	2010	142,013	138,802	112,540	84,137	38,667	0,884	18,576	12,755
	2020	142,452	141,068	123,568	223,569	40,394	1,290	13,960	8,665
	2022	145,297	143,811	126,474	224,631	37,257	1,277	13,620	8,994
	2022 share in global production, %	3.65	7.13	11.07	4.41	7.74	1.08	6.86	2.17

End of Table 2

Country	Year	Round-wood, thsnd m <sup>3</sup>	Industrial round-wood, thsnd m <sup>3</sup>	Sawlogs and veneer logs, thsnd m <sup>3</sup>	Wood chips, particles and residues, thsnd m <sup>3</sup>	Sawn-wood, thsnd m <sup>3</sup>	Fibre-board, thsnd m <sup>3</sup>	Pulp for paper, thsnd tons	Paper and paper-board, thsnd tons
China	2000	323,646	96,019	53,221	11,985	6,675	5,181	14,855	35,184
	2010	350,633	161,810	74,417	108,735	37,231	42,499	20,420	96,545
	2020	324,851	167,863	82,534	148,381	77,468	62,300	20,557	117,150
	2022	318,605	167,347	82,018	148,381	79,558	54,560	27,100	128,370
	2022 share in global production, %	8.00	8.30	7.18	29.11	16.53	46.30	13.65	31.00
Russian Federation	2000	158,101	145,575	96,896	3,800	20,000	0,890	5,752	5,310
	2010	175,499	161,595	107,559	15,500	28,870	1,710	7,346	5,606
	2020	218,303	203,194	136,198	24,278	41,797	3,581	8,865	9,527
	2022	197,191	182,082	122,047	21,396	38,000	3,706	8,869	9,293
	2022 share in global production, %	4.95	9.03	10.68	4.20	7.90	3.14	4.47	2.24
United States of America	2000	466,549	420,619	242,698	86,273	91,076	6,990	57,178	86,252
	2010	376,572	336,135	148,119	53,748	60,013	8,195	50,251	75,773
	2020	429,700	369,175	180,237	57,501	79,134	6,058	49,903	66,239
	2022	458,774	382,544	186,157	62,262	81,676	6,058	46,657	65,257
	2022 share in global production, %	11.52	18.97	16.30	12.22	16.97	5.14	23.5	15.76
World	2000	3,482,411	1,687,166	1,051,456	329,970	384,037	34,141	183,496	324,606
	2010	3,587,131	1,723,129	953,559	474,635	375,102	87,668	184,937	392,378
	2020	3,910,124	1,983,576	1,126,496	498,753	479,970	122,123	191,470	400,126
	2022	3,983,336	2,016,041	1,142,343	509,716	481,256	117,846	198,571	414,094

The analysis of the production and export of forest products shows significant regional and country differences. Despite the availability of significant forest resources in a number of exporting countries, such as Brazil, Canada and Russia, the production capacities for processing wood raw materials are limited. In this regard, these countries are forced to export unprocessed wood and lumber to countries with high domestic demand for forest products. Thus, a flow of forestry raw materials is formed from exporting countries to importing countries with increasing industrial processing of wood (China, India, the Middle East and Central Asia).

Anyway, logging and timber trade in the world continues to be a significant process, despite innovations and new technologies. For 50 years, the volume of logging has increased by 1.5 times, and exports by 4 times. Logging and export volumes have remained stable over the past few years.

The ecological and social importance of the timber industry complex does not yet contribute to improving its position in the global economy and industrial production. Despite this, the contribution of the complex to the global economy, according to the UN, is gradually increasing. Thus, in 2015, the direct contribution amounted to more than \$ 663 bn. However, this amount represents only a small portion of the overall global income. When considering the total economic impact (direct, indirect, induced), the forestry sector's contribution amounted to \$1.5 tn in 2015, which is a significant figure compared to the global national income for the same year.

\$111.5 tn is a small value. Pulp and paper production accounts for the largest contribution to the production of benefit of the timber industry complex (30 %).

The remaining branches of the complex account for from 20 to 25 %. The UN states that developed countries have the largest contribution to the gross income from the timber industry complex. Forest ecosystems make a significant contribution to the global economy. This impact is most pronounced in Asian nations, especially those in East Asia, which account for half of the total economic benefits derived from forests worldwide. European nations play a significant role in the global forestry sector, constituting a considerable 27 % of its economic activity. America's contribution is more modest, at around 17 %. Both developing and developed nations demonstrate high levels of proficiency in logging practices. Despite Russia having significant forest resources, its share in the global timber industry complex is only 3 %, and its contribution to GDP is less than 1 %.

Thus, the states with extensive forest resources have a long-term advantage over timber-importing countries. Sustainable forestry practices are essential for maintaining a prominent global standing. While China possesses fewer forest resources than Russia, its strategic approach to timber industry has yielded considerable success. This strategy, aimed at increasing wood imports and developing environmentally friendly logging methods, has allowed China to achieve significant growth rates in the production of various forest products [15, 16].

The trend determinant of the constant growth in demand for wood in connection with the construction of factories has led to an increase in own natural logging and the operation of plantation plantings, which has allowed by 2010 to increase logging to 96 mln m<sup>3</sup>, which is almost 70 % of the demand for wood. Today, China accounts for a quarter of the world's wood supplies, and it primarily imports high-quality large-sized wood [3–7]. The Chinese government's strategic approach and deliberate policy initiatives have led to significant success in developing their forest ecosystem. A significant share of the funds allocated from the national budget for forestry is directed to the centralized financing of state forestry enterprises, scientific research and development designed to ensure sustainable forest management, conservation and reproduction. It should be emphasized that a significant part of government spending in China is directed to the implementation of forest restoration programs. Large-scale integrated environmental projects are being implemented in the country, covering all aspects of the use of forest resources. These projects provide for the protection of natural habitats, the mandatory restoration of deforested areas and the creation of effective commercial forest belts in regions specializing in the woodworking industry. Through these concerted efforts, China has efficiently replenished its forest reserves and expanded its forest coverage at a rapid pace. Consequently, China has emerged as a leader globally in terms of forest resource growth rates. Moreover, the judicious siting of primary and ancillary production facilities proximal to consumer hubs enables minimization of logistical expenses. In addition, the rational placement of main and auxiliary production facilities near the consumption centers allows minimizing logistical costs. In the north-east of China, processing facilities are being established in border areas with Russia. As a result of an effective policy and strategy for the development of the timber industry complex, China has increased production of medium and deep processing products by 2023. Thus, sawnwood production has increased 12-fold since 2000 by 2023. Over the same period, the production of fibreboard has increased 10-fold, paper and cardboard – 4-fold, and pulp – twice. Russia handles the initial stages of wood processing, subsequently exporting the raw materials to

various Chinese manufacturing facilities for further refinement. As a result, China's forestry industry outperforms Russia in the production of numerous wood-based products. In addition, a significant difference should be noted in the growth rates of pulp and paper production in China and Russia (Fig. 5, 6). Forecasts for the development of China's industry demonstrate a much more optimistic scenario compared to both Russian forecasts and trends observed in other leading countries of the timber industry. And this is against the background of the fact that the volume of China's own timber harvesting is much smaller. Russia's timber industry continues to focus on the production of lower quality wood products, with limited progress in advanced wood processing techniques. This stagnation is characterized by insufficient investment and a lack of development in large-scale factory infrastructure or the implementation of new production capabilities.

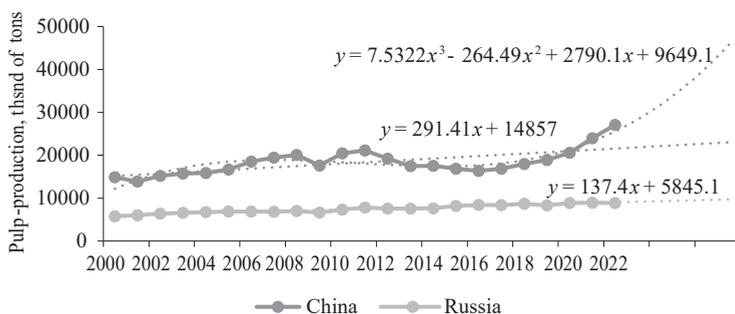


Fig. 5. The pulp-production trends in Russia and China [18]



Fig. 6. The dynamics of cardboard and paper production in Russia and China [18]

The construction crisis in China, marked by falling demand for real estate and reduced investment, may have an indirect impact on exports of timber products from Russia. Firstly, a decrease in the demand for building materials and raw materials from Chinese developers will lead to a decrease in purchases of Russian products, including wood. This may cause a drop in prices for these goods, which will negatively affect the incomes of Russian exporters. Secondly, a reduction in construction volumes in China may slow down the dynamics of the country's economy, which, in turn, will reduce the overall demand for Russian energy resources, especially oil and gas. Close connectivity and dependence on the Chinese market may encourage Russia to seek new export destinations by developing economic ties with other countries, which may lead to a more diverse export structure and less vulnerability.

Finland specializes in manufacturing of a wide range of wood products such as lumber and paper, which makes it an important supplier in the global market. The Finnish timber industry complex constitutes about 5.7 % of the country's gross

output. Forest products with 20 % revenue dominate Finland's exports. The volume of wood harvesting in Finland is up to 45 mln m<sup>3</sup> annually. The timber industry complex plays a significant role in Finland's economy, constituting nearly one-fifth of its total industrial output. To effectively manage this vital industry, the Finnish government has collaborated with private enterprises to establish a specialized cluster model. Today, Finland has modern and competitive deep wood processing plants. During the construction of timber enterprises, the introduction of innovative waste-free developments, the creation of lean production and the use of biotechnologies has been a mandatory requirement. The continuous modernization of timber industry complex in Finland has been carried out with the simultaneous improvement of logging and the expansion of transport infrastructure [10–13]. The closure of plywood factories in Finland has become a serious challenge for the country's economy, having a ripple effect on many industries and communities. This process is also associated with global changes in demand for wood materials and increasing competition from international manufacturers. Additional factors contributing to the closure have been environmental initiatives and the transition to sustainable production methods. Finland, as one of the leading countries in the field of forestry, is trying to adapt to new realities, striving to produce more environmentally friendly products. However, despite the positive intentions, the consequences for jobs and the economic well-being of the small towns where these factories are located have a devastating effect.

Forests cover half of Canada's land, making timber industry a key player in the country's economy. The timber industry complex contributes 2.7 % to its GDP. Forestry management in Canada falls under the authority of the Ministry of Natural Resources, with the Forest Service responsible for coordinating forest policy at the national level. In Canada, the forest cluster is supported at all levels of management. The National Council for Development and Research coordinates strategies for the development of the forestry sector. The implementation of cluster policy at the regional level is entrusted to municipal authorities. The Canadian Government supports priority areas for the development of the forestry sector, such as attracting investments, shaping foreign economic policy and promoting Canadian forest products on the world market [11].

Forest certification in Finland and Canada also plays a huge role in the management of the timber industry complex. Both countries have implemented strict standards and criteria to help their forests conserve biodiversity and ecosystem services. In Finland, where forests cover more than 75 % of the country's territory, certification contributes not only to environmental protection, but also to the maintenance of the local economy, responding to the needs of both producers and consumers of environmentally friendly products. Canada, with its vast forest lands, also demonstrates an example of successful application of certification standards, strengthening its position on the international stage as a responsible player in the global forestry sector. Thus, forest certification in these countries is not just a formality, but an important tool that helps to build a balance between economic development and nature protection, which is of critical importance in the context of global climate change.

The Swedish timber industry complex also has optimal development. Despite the fact that there are no large-scale forest resources, unlike in Russia and Canada, the country has introduced an effective model for the development of the timber industry complex, which has ensured its leading position in the economy. In Sweden,

there is a legislative rule for reforestation, which states that the volume of reforestation must exceed logging. The share of the Swedish forestry sector in the country's economy is 10 %, and the volume of timber exports exceeds 15 % [9, 10]. Together with reforestation activities, in Sweden, a certification system for forests and forest products has been implemented.

In the United States, the forest sector has gone through a long period of transformation, which has brought both positive and negative results [9, 10]. Despite the difficulties, this reform has made it possible to develop a paradigm for the sustainable use of forest resources, characterized by minimal environmental risks. The fundamentals of the American forestry industry are based on a multifaceted, multi-level system and various forms of forest ownership. In particular, protected areas are under the jurisdiction of government agencies, while forests used for industrial purposes are privately owned. The US timber industry complex generates a 6 % revenue of GDP. The United States harvests approximately 440 mln m<sup>3</sup> of timber annually from a forested area covering 4.5 mln ha. This represents 6 % of the global timber harvest volume. The USA is the leader in the export of waste paper (34 %) and wood pellets (25 %).

At the same time, the efficiency of development of the forest sector cannot be correlated with the form of ownership of forest resources, which varies significantly across countries, but nevertheless does not reduce development potential. Thus, in Canada, the province or federal government owns most forests. In Sweden and Finland, private individuals own most forests. Private ownership of forests is also used in the United States. In China, forests are publicly owned, with the exception of collective ownership. The timber industry complex of these countries is developing innovatively thanks to 2 approaches to optimization. The initial strategy involves the establishment of clusters that foster innovation in utilization of forest resources through the development of cutting-edge technologies. This endeavor is facilitated by collaborative efforts between territorial associations, trade unions representing enterprises, government agencies, and institutional investors. Through this integrated approach, production processes are streamlined.

The structure of the global timber market is gradually changing, which is associated with different activators. Such drivers are an increase in the quantitative and qualitative increase in the consumption of forest products, the emergence of more equipment that is productive and technologies, the introduction of new energy-saving and waste-free technologies, as well as the development of innovative types of forest products. The Russian timber industry complex has been forced to form new external supply channels for forest products. At the same time, exports of timber products to Asia and the CIS countries have increased significantly.

An analysis of the practice of international timber trade demonstrates that the availability of significant forest resources in the country is not a sufficient condition for effective forestry management and the development of a full cycle of wood processing into competitive products. It is important to note that the state, which is actively developing the logging industry, manages, despite the lack of wood raw materials on the domestic market, to create effective wood processing enterprises. These industries specialize in designing premium-quality goods by utilizing imported raw materials. This enables them to engage successfully in both regional and international trade, leading to a rise in imported goods and an expansion of their own production capacities. A similar competitive approach has been implemented in the countries of the Asian geographical region (China and Vietnam), which has served as a prec-

edent for potential imitation. The effective functioning of the global forest system requires coordinated environmental management and planning of the use of forest resources. This will contribute to the conservation of forests around the world. No less important is the rational and integrated production of final forest products, meeting the growing global needs.

It is important to take into account many factors, such as the level of infrastructure development, the availability of modern recycling technologies, a working management system and compliance with environmental standards. Investments in scientific research and education also play a significant role in improving the efficiency of the timber industry complex and increasing the added value of products. At the same time, the centers of value-added education are shifting precisely to countries where the creation of timber processing facilities is ensured. When choosing the path for the development of timber industry complexes, national security should also be taken into account, since the foreign policy of the countries supplying raw materials (duties, export restrictions, etc.) can significantly affect the stability of the operation of timber processing complexes. Here, a rational combination is needed not only in the provision of timber and raw materials (for Russia, the import of raw materials is of no interest), but also in the volumes of products exported and domestic consumption in order to avoid dependence on the external economic conjuncture of prices and demand. In addition, international agreements and standards aimed at combating illegal deforestation and environmental degradation are becoming increasingly relevant. Countries seeking to integrate into global markets must adapt their practices to these requirements, which will not only preserve natural resources, but also increase their competitiveness in the global arena.

The results of global timber production and the export-import balance of trade flows depend on a variety of general economic and political factors, as well as intra-industry ones. The latter include the state of the infrastructure, the availability of modern recycling technologies, as well as the management system and compliance with environmental standards. Investments in scientific research and education also play a significant role in improving the efficiency of timber industry complex and increasing the added value of products. The global production of the main types of products in future until 2025–2026 is going to change slightly: roundwood – 4,000–4,050 mln m<sup>3</sup>, business wood – 2,050 mln m<sup>3</sup>, lumber – 4,900 mln m<sup>3</sup>, cellulose – no more than 200 mln tons, paper and cardboard – 420–430 mln tons. There is a change in trade flows and the centers of value-added education are going to continue to shift to countries where the creation of timber processing facilities is ensured. When choosing the path for development, forest-rich countries are also going to take into account national security, since the foreign policy of the countries supplying raw materials (duties, export restrictions, etc.) can significantly affect the stability of timber processing complexes. Here, a rational combination is needed not only in the provision of timber and raw materials (for Russia, the import of raw materials is of no interest), but also in the volumes of products exported and domestic consumption in order to avoid dependence on the external economic conjuncture of prices and demand. In addition, international agreements and standards aimed at combating illegal deforestation and environmental degradation are becoming increasingly relevant. Countries seeking to integrate into global markets must adapt their practices to these requirements, which will not only preserve natural resources, but also increase their competitiveness in the global arena.

## REFERENCES

1. Aborkina E.O. Causes and Trends in the Development of the Russian Forest Complex. *V tsentre ekonomiki* = In the Center of the Economy, 2022, vol. 3, no. 2, pp. 39–45. (In Russ.).
2. Adiyia M., Ashton W. *Comparative Research*. Brandon University, Rural Development Institute, 2017. 8 p.
3. Ahrends A., Hollingsworth P., Beckschäfer P., Chen H., Zomer R.J., Zhang L., Wang M., Xu J. China's Fight to Halt Tree Cover Loss. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, vol. 284, iss. 1854, art. no. 20162559. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2559>
4. Antonova N.E. The Relationship between Forest Management Concepts and Forest Policy: Theory and Reality. *Uchenye zapiski* = Scientific Notes: Collection of Articles, 2019, iss. 15, pp. 6–17. (In Russ.).
5. Antonova N.E. Features of the Manifestation of New Internal and External Shocks in the Forest Complex of the Far Eastern Federal District and Their Possible Consequences. *Regionalistica*, 2022, vol. 9, no. 5, pp. 17–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.14530/reg.2022.5.17>
6. Barnosky A.D., Matzke N., Tomiya S., Wogan G.O.U., Swartz B., Quental T.B., Marshall C., McGuire J.L., Lindsey E.L., Maguire K.C., Mersey B., Ferrer E.A. Has the Earth's Sixth Mass Extinction Already Arrived? *Nature*, 2011, vol. 471, pp. 51–57. <https://doi.org/10.1038/nature09678>
7. Best A.L. The Forestry Outlook in Canada. *The Forestry Chronicle*, 1960. vol. 36, no. 3, pp. 260–264. <https://doi.org/10.5558/tfc36260-3>
8. Birben Ü., Ünal H.E., Karaca A. Examination of the Perception of Society Related to Forest Resources (Case of Çankırı City Center). *Turkish Journal of Forestry*, 2018, vol. 19, iss. 1, pp. 76–82.
9. Bulgakova M.A., Samolysov P.V. Issues of Interaction between Antitrust and Law Enforcement Agencies during the Investigation of Crimes Related to Restriction of Competition. *Investigative Activity: Present and Future: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Krasnodar, LLC “Periscope-Volga”, 2018, pp. 57–62. (In Russ.).
10. Burdakova G.I., Byankin A.S., Meshkov A.S. Study of Regional Demand for Timber Industry Products in the Context of External Sanctions Pressures. *π-Economy*, 2023, vol. 16, iss. 1, pp. 98–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JE.16107>
11. Çalışkan H., Birben Ü., Özden S. Forest in Comparative Law: Germany, People's Republic of China, Canada, Nigeria, and Türkiye. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2024, no. 2, pp. 103–112. <https://doi.org/10.15372/SJFS20240211>
12. Davydova G.V., Biryukova A.I., Litvin D.A. Features of the Development of the Forest Industry and Forestry in Russia and Abroad. *Izvestiya Bajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Baikal State University, 2022, vol. 32, iss. 2, pp. 325–332. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2022.32\(2\).325-332](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2022.32(2).325-332)
13. Dzhikovich Yu.V., Garkusha A.D. Formation of State Policy in the Field of Forest Relations. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2022, no. 10-1(130), pp. 104–107. (In Russ.).
14. FAO. 2020. *FAO Yearbook of Forest Products 2018*. Italy, Rome, FAO UN, 2020. 430 p. <https://doi.org/10.4060/cb0513m>
15. FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*. Italy, Rome, FAO UN, 2020. 184 p. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
16. FAO. 2020. *Global Forests Resources Assessment 2020: Report. China*. Italy Rome, FAO UN, 2020. 81 p.
17. FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Report. Germany*. Italy, Rome, FAO UN, 2020. 74 p.
18. FAOstat. Available at: <https://www.fao.org/faostat/> (accessed 5.10.24).
19. Gregory P.R., Stuart R.C. *Comparing Economic Systems in the Twenty-First Century*. Houghton Mifflin, 2004. ch. 1–2, pp. 3–36.
20. Huang Z., Liu Z. A Complex Terrain Simulation Approach Using Ensemble Learning of Random Forest Regression. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2022, vol. 50, pp. 2011–2023. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01585-w>

21. Husa J. Comparative Methodology and Constitutional Change. *Routledge Handbook of Comparative Constitutional Change* (Routledge 2019). Helsinki Legal Studies Research Paper, 2019, no. 57. 25 p.

22. Ivantsova E.D. Is Timber Investment Actually the Driver of Logging Growth and Human Welfare? *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Gumanitarnye nauki* = Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences, 2022, vol. 15, no. 7, pp. 955–964. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1370-157-0900>

23. Karkhova S.A. Factors Contributing to Global Demand for Forest Products. *Problems of Territory's Development*, 2019, no. 5(103), pp. 91–108. <https://doi.org/10.15838/ptd.2019.5.103.6>

24. Krivokochenko L.V. World Timber Markets: State and Prospects for Russia's Exports. *Rossiiskij vneshneekonomicheskij vestnik* = Russian Foreign Economic Bulletin, 2016, no. 2, pp. 71–81. (In Russ.).

25. Latypova V.D. Possible Scenarios for the Development of the Activities of the Irkutsk Region Timber Industry Complex. *Izvestiya Bajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Baikal State University, 2023, vol. 33, no. 3, pp. 531–538. (In Russ.).

[https://doi.org/10.17150/2500-2759.2023.33\(3\).531-538](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2023.33(3).531-538)

26. Lee G.R., Haas L. Comparative Methods in Family Research. *Sourcebook of Family Theories and Methods*. Springer, Boston, MA, 2009, pp. 117–131.

[https://doi.org/10.1007/978-0-387-85764-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-85764-0_5)

27. Lukina N.V. Global Challenges and Forest Ecosystems. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2020, vol. 90, no. 6, pp. 528–532. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869587320060080>

28. Lukina N.V. Global Challenges, Forests and Earth Remote Sensing. *Zemlya i vseleennaya*, 2020, no. 6, pp. 18–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S004439482006002X>

29. Medvedev S.O., Chupina Ya.F., Ryabova T.G., Zyryanov M.A. Some Aspects of Foreign Experience in the Development of Timber Enterprises. *Vektor ekonomiki* = Vector economy, 2023, № 2. (In Russ.). [https://doi.org/10.51691/2500-3666\\_2023\\_2\\_1](https://doi.org/10.51691/2500-3666_2023_2_1)

30. Mochaeva T.V., Chernyakevich L.M. Financial and Economic Mechanism for the Implementation of the National Forest Policy. *Finansovyj biznes*, 2021, no. 2, pp. 37–40. (In Russ.).

31. Muraev I.G., Smetanin A.V., Sushko O.P. Comparative Analysis of Forest Complex Activities in Forest-Rich Countries. *Kreativnaya ekonomika*, 2023, vol. 17, no. 9, pp. 3357–3378. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/ce.17.9.118912>

32. Nguadi F., Gorbunova O.I. Forests of the Republic of the Congo: Assessment of the State, Problems and Prospects of Use. *Global and Regional Research*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 18–26. (In Russ.).

33. Ogana F.N., Ercanli I. Modelling Height-Diameter Relationships in Complex Tropical Rain Forest Ecosystems Using Deep Learning Algorithm. *Journal of Forestry Research*, 2022, vol. 33, pp. 883–898. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01373-1>

34. Pronyaeva L.I., Pavlova A.V., Fedotenkova O.A. The Development of the National Forestry Sector: Trends and Prospects. *Natsionalnye interesy. Prioritety i bezopasnost'* = National Interests: Priorities and Security, 2020, vol. 16, iss. 10, pp. 1834–1856. (In Russ.). <https://doi.org/10.24891/ni.16.10.1834>

35. Rampino M.R., Shen S.-Z. The End-Guadalupian (259.8 Ma) Biodiversity Crisis: the Sixth Major Mass Extinction? *Historical Biology*, 2021, vol. 33, iss. 5, pp. 716–722. <https://doi.org/10.1080/08912963.2019.1658096>

36. Rykova I.N., Yurieva A.A., Morina V.A. Review of Certain Foreign Practices in the Field of Forestry Development. *Vestnik Severo-Osetinskogo gosudarstvennogo universiteta imeni K.L. Khetagurova* = Bulletin of North Osetian State University named after K.L. Khetagurov, 2022, no. 2, pp. 130–138. (In Russ.).

<https://doi.org/10.29025/1994-7720-2022-2-130-138>

37. Savenya D.N. Foreign Experience of Development of the Forest Complex in Modern Conditions. *Alleya nauki*, 2018, vol. 2, no. 10(26), pp. 87–90. (In Russ.).

38. Senotrusova S.V., Tszya B. The Impact of Western Sanctions on Russia's Forest Complex. *Innovatsii i investitsii* = Innovation and Investment, 2023, no. 9, pp. 447–451. (In Russ.).

39. Shalaev V.S., Rykunin S.N., Melekhov V.I. Forecasting Research of “Forest Products”. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 110–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-1-110-117>
40. Shchastyantseva E.I., Suvorova L.A. Comparative Analysis of the Development of the Timber Industry Complex of Foreign Countries. *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2017)*: Collection of Articles of the All-Russian Annual Scientific and Practical Conference. Kirov, Vyatka State University Publ., 2017, pp. 5230–5240. (In Russ.).
41. Shmatkov N.M., Kulikova E.G. International Experience in the Formation of National Forest Policies. *Materials of Non-Governmental Organizations for the Development of the National Forest Policy of the Russian Federation*. Moscow, World Wildlife Fund Publ., 2012, pp. 54–81. (In Russ.).
42. Starikov E.N., Evseeva M.V., Naumov I.V. Industrial Growth and Specialisation: The Impact of the Government Support Tools. *Journal of New Economy*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 86–108. <https://doi.org/10.29141/2658-5081-2022-23-3-5>
43. Starikov E.N., Pryadilina N.K., Mezenova V.V. Analysis of Structural Changes and Major Trends in the Development of Logging Industry in the Global Market. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2014, no. 4(16), pp. 231–240. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/8481>
44. Sushko O.P., Plastinin A.V., Skvortsov D.A. *Methodological Approaches to Assessing the Effectiveness of the Functioning of Timber Industry Institutions*. Moscow, “Pero” Publ. House, 2022. 138 p.
45. Terenteva V.D. Opportunities and Threats to the Potential of the Timber Industry of the Russian Federation in the Conditions of Economic Blockade. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*, 2021, no. 12(137), pp. 525–529. (In Russ.). <https://doi.org/10.34925/EIP.2021.137.12.101>
46. Tsvirkov V.V., Casko L.I., Karashchuk M.N. International Experience in Management Forestry Complex. *Trudy BGTU. Seriya 5: Ekonomika i upravlenie* = Proceedings of BSTU. Series 5: Economics and Management, 2021, no. 1, pp. 130–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.52065/2520-6877-2021-244-1-130-138>
47. Ushkalova D.I. Russia's Foreign Trade under Sanctions Pressure. *Zhurnal novoj ekonomicheskoy assotsiatsii* = Journal of the New Economic Association, 2022, iss. 3(55), pp. 218–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.31737/2221-2264-2022-55-3-14>
48. Vehola A., Malkamäki A., Kosenius A.-K., Hurmekoski E., Toppinen A. Risk Perception and Political Leaning Explain the Preferences of Non-Industrial Private Landowners for Alternative Climate Change Mitigation Strategies in Finnish Forests. *Environmental Science & Policy*, 2022, vol. 137, pp. 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.09.003>
49. Vertakova Yu.V. Improving the System of State Forest Management Taking into Account Foreign Experience and Russian Practice of Digitalization of Forest Growth and Management. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment* = Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 46–62. (In Russ.).
50. Yiliyaer A., Aliu A. Contemporary Administrative Law Principles in People's Republic of China. *Journal of Turkish Justice Academy*, 2018, vol. 35, pp. 641–664.
51. Zhang Y., Qin Q., Fan J., Chen K. Comparative Analysis of Forest Conservation and Sustainable Forest Management in China and Germany. *Asian Agricultural Research*, 2013, vol. 5, no. 10, pp. 117–124.

**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

Original article

УДК 630\*23(470.45)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-172-182

### Influence of Décor and Overlay Paper Mass on Laminate Floor Product Properties

**Murat Aydin**<sup>1</sup>✉, *Doctor of Science, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [ADK-7476-2022](https://orcid.org/0000-0002-3015-1868),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3015-1868>

**Mehmet Erdal Kara**<sup>2</sup>, *Doctor of Science*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1741-8211>

**Osman Çamlıbel**<sup>3</sup>, *Doctor of Science, Assoc. Prof.*; ResearcherID: [S-3506-2017](https://orcid.org/0000-0002-8766-1316),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8766-1316>

<sup>1</sup>Isparta University of Applied Sciences, Bahçelievler Mh,143, Cd no. 2, Isparta, 32200, Türkiye; [murataydin@isparta.edu.tr](mailto:murataydin@isparta.edu.tr)✉

<sup>2</sup>Kastamonu Entegre Ağaç Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kastamonu Organize Sanayi Bölgesi, 7, Cd. no 2/8, Halife Köyü, Kastamonu, 37200, Türkiye; [erdal.kara@keas.com.tr](mailto:erdal.kara@keas.com.tr)

<sup>3</sup>Kırıkkale University, Ankara Yolu, 7 km, Yahşihan / Kırıkkale, 71450, Türkiye; [osmancamlibel@kku.edu.tr](mailto:osmancamlibel@kku.edu.tr)

Received on May 20, 2024 / Approved after reviewing on August 14, 2024 / Accepted on August 18, 2024

**Abstract.** Laminate flooring products are among the essential construction and building materials not only because of their aesthetics, but also their ability to provide energy saving, sound insulation, prevent surface scratches, and minimize maintenance such as periodic varnishing in the case of solid wood flooring, etc. Even though the laminate flooring products are scratch-resistant and easy to install, they must meet the standard requirements. Therefore, optimizing the production parameters of laminate flooring products is of interest in research and development to obtain cost-effective products that not only compete in the market but also represent scientific communities' studies. In this sense, production parameters such as paper properties, core material type and properties, resin utilization, pressing conditions (pressure, duration, and temperature), etc. come to the forefront. From this point of view, the effect of décor (105, 115, and 125 g/m<sup>2</sup>) and overlay (90 and 95 g/m<sup>2</sup>) paper mass on the surface abrasion (SA), abrasion resistance (AR), impact resistance (IR) and cure properties of laminate floor products which have been industrially produced has been figured out. According to the results, SA, AR, IR, and cure values ranged from 3,600–4,800 revolutions, 4.5–5.0, 110–130 N, and class 5, respectively. According to BS-EN 13329 and BS-EN 14323, products meet the requirements. However, the effect of paper masses on properties has been found to be unstable due to oscillations and no changes observed. In the literature, there are scarcely any studies that figure out these parameters and the authors think that the results of this study may provide valuable data for the comparison.

**Keywords:** laminate floor, overlay paper, décor paper, high-density fiberboard

**Acknowledgements:** The authors would like to thank Kastamonu Entegre Ağaç Co. for providing all opportunities for performing this study.

*For citation:* Aydın M., Kara M.E., Çamlıbel O. Influence of Décor and Overlay Paper Mass on Laminate Floor Product Properties. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 172–182. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-172-182>

Научная статья

## Влияние свойств накладной и декоративной бумаги на характеристики ламинированного напольного покрытия

*М. Айдын*<sup>1</sup>✉, д-р наук, доц.; *ResearcherID:* [ADK-7476-2022](https://orcid.org/0000-0002-3015-1868),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3015-1868>

*М.Е. Кара*<sup>2</sup>, д-р наук; *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-1741-8211>

*О. Чамлыбель*<sup>3</sup>, д-р наук, доц.; *ResearcherID:* [S-3506-2017](https://orcid.org/0000-0002-8766-1316),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-8766-1316>

<sup>1</sup>Университет прикладных наук Испарты, Бахчелиэвлер, ул. 2, д. 143, Испарта, Турция, 32200; [murataydin@isparta.edu.tr](mailto:murataydin@isparta.edu.tr)✉

<sup>2</sup>Кастамону Интергейтед Вуд Индастри энд Трэйд Инк., орг. пром. зона Кастамону, ул. 2/8, д. 7, дер. Халифа, Кастамону, Турция, 37200; [erdal.kara@keas.com.tr](mailto:erdal.kara@keas.com.tr)

<sup>3</sup>Университет Кырыккале, дор. Анкара–Кырыккале, 7-й км, Яхшихан/Кырыккале, Турция, 71450; [osmancamlibel@kku.edu.tr](mailto:osmancamlibel@kku.edu.tr)

---

*Поступила в редакцию 20.05.24 / Одобрена после рецензирования 14.08.24 / Принята к печати 18.08.24*

---

**Аннотация.** Ламинированные напольные покрытия входят в число базовых строительных материалов не только из-за своей эстетичности, но и благодаря возможности с их помощью обеспечить энергосбережение, звукоизоляцию, предотвратить царапины на поверхности и минимизировать уход, такой как периодическая лакировка в случае с напольными покрытиями из массива дерева и др. Несмотря на то, что ламинированные напольные покрытия устойчивы к царапинам и просты в укладке, они должны соответствовать стандартным требованиям. Поэтому оптимизация параметров производства ламинированных напольных покрытий представляет интерес для научных исследований и разработок, нацеленных на получение экономически эффективной продукции, которая не только конкурентноспособна на рынке, но и репрезентует результаты деятельности научных сообществ. В этом смысле на первый план выходят следующие параметры: свойства бумаги, тип и характеристики материала сердцевины, использование смолы, условия прессования (давление, продолжительность, температура) и т. д. Определено влияние массы декоративной (105, 115 и 125 г/м<sup>2</sup>) и покровной (90 и 95 г/м<sup>2</sup>) бумаг на истираемость поверхности, устойчивость к истиранию, ударопрочность и износостойкость ламинатных напольных покрытий, произведенных промышленным способом. Результаты исследования продемонстрировали, что показатели варьировали в пределах 3600–4800 об., 4,5–5,0, 110–130 Н и класса 5 соответственно. Продукция отвечает требованиям стандартов BS-EN 13329 и BS-EN 14323. Однако было обнаружено, что влияние массы бумаги на свойства нестабильно: наблюдались колебания показателей или отсутствие изменений. В литературе почти нет сведений об указанных параметрах, поэтому результаты этой работы могут представлять ценные данные для сравнения.

**Ключевые слова:** ламинированный пол, покровная бумага, декоративная бумага, древесноволокнистая плита высокой плотности

**Благодарности:** Авторы хотели бы поблагодарить компанию Кастамону Интегрейтэд Вуд Индастри энд Трэйд Инк за предоставление возможностей для проведения данного исследования.

**Для цитирования:** Aydın M., Kara M.E., Çamlıbel O. Influence of Décor and Overlay Paper Mass on Laminate Floor Product Properties // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 172–182. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-172-182>

### *Introduction*

Laminate floor products, composed of balance paper, core, décor paper, and overlay, are generally manufactured with wood and wood-based materials. The purpose of each layer is different such as providing aesthetic appearance (décor paper), surface wearing protection (overlay), a stable main structure (high-density fiberboard (HDF), core), and balancing the opposing layers against warping (balance paper).

The market share of laminate products in flooring applications increases day by day due to their advantages against traditional flooring products such as solid wood parquets. This increase also brings some challenges in wood-based engineered product manufacturing sector. Furthermore, up-to-date standards may require some advancements for these products. On the other hand, cracking, brightness, staining, tone, and level difference are some of the major problems encountered in laminate flooring applications [8]. As a result, manufacturers invest in research and development activities, and researchers report on their studies. However, when the literature has been reviewed, the limited number of studies that evaluate the influence of these layers' properties on laminate flooring products has been discovered, and the following are some of the recent studies [1, 3, 9, 10, 12, 14, 17, 19, 21, 22]. The surface roughness of laminate flooring product (melamine resin-saturated paper overlay) has been determined by Kalaycıoğlu and Hızıroğlu [11]. Nemli [15] has evaluated the influence of surface coating types (varnish and overlaying materials) on the abrasion resistance of particleboards. However, the influence of overlay paper on the laminate floor product properties has scarcely been evaluated. Kara et al. [12, 13] have figured out the effect of overlay paper on laminate floor properties. Apart from overlay paper, the fact is that the influence of décor paper on laminate floor products is uncertain, but İstek et al. [7] have evaluated this issue using particleboard. Therefore, this study is aimed to figure out the influence of overlay and décor paper properties on laminate floor properties.

### *Research Objects and Methods*

The core of the laminate flooring, HDF, has been produced using 75 and 25 % fiber mixture of Oriental spruce (*Picea orientalis* L.) and Oriental beech (*Fagus orientalis* L.), respectively. The refining process has been performed using Andritz AG 2008 (Graz, Austria). The fiber mixture has been sequentially blended with 11.8 % wt. kg/m<sup>3</sup> urea formaldehyde (UF) resin, 0.9 % wt. kg/m<sup>3</sup> hardener (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), and 1.19 % wt. kg/m<sup>3</sup> liquid paraffin. The moisture level of fiber has been set to 12.8 %. The mat has been pre-pressed and hot-pressed by Siempelkamp (Krefeld, Germany) press at a speed of 820 mm/s and temperature of 220 °C for 70 s. The boards with the density of 885 kg/m<sup>3</sup> and the dimensions of 7.4×2,097×7,365 mm

have been produced. Following the cooling stage, the boards have been stored for 5 days at a temperature of 20 °C and relative humidity of 65 %. Then, the boards have been sequentially sanded using 60-, 80-, 100-, and 140-grit sandpapers to obtain 7.4±0.1 mm thickness.

Table 1

### The resin properties during the impregnation process

Properties	UF resin	MF resin
Solid Matter (%)	50	54
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.22	1.25
Mol ratio (g/mol)	1.65	1.55
Viscosity (cP)	20–50	25–50
pH	7–9	8.8– 9.8
Jelling time (s)	20–35	–
Discharging time (s)	10–20	10–20
Water tolerance	–	1/1–1/2.5

The UF and melamine formaldehyde (MF) resin properties are presented in Table 1. The impregnation details of decor, overlay, and balance papers are presented in Table 2. Chemicals (hardener, antibacterial agents, etc.) have been applied to overlay and décor paper resins. The total jelling time of the overlay, décor paper, gravure unit, and balance paper resins (300 kg for each) have been 4.35, 4.50, 4.20, and 3.30 min, respectively.

Table 2

### The impregnation process

Paper type (g/m <sup>2</sup> ) UF (%)		1. Wash	1. Oven temp	1. Oven fan speed	2. Wash	2. Oven temp	2. Oven fan speed	Paper final mass	Paper moisture	Corundum
		°C	RPM	MF (%)	°C	RPM	g/m <sup>2</sup>	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/m <sup>2</sup> )	
Decor	40 (A1–A2–A3–A4)*	100	110	850	100	135	850	105	6.0±0.2	–
	115									
	115									
	125									
Overlay	18	–	–	–	100	130	850	90	6.9–7.2	12
	22 (Control)	–	–	–	100	130	850	95	6.9–7.1	12
Balance	50	–	–	–	100	145	800	115	6.8–7.1	–

\*Product types. RPM – revolutions per minute.

Wemhöner Press (Herford, Germany) has been used for hot-pressing at the temperatures of 202 °C (top plate) and 204 °C (bottom plate). The pressure and duration of pressing have been 38 kg/cm<sup>2</sup> and 14.8 s, respectively. Following manufacturing, the products have been acclimatized for 5 days at a temperature of 20 °C and relative humidity of 65 %. After conditioning, surface abrasion (AC3 ≥ 2000 revolutions, BS-EN 13329:2023 [4]), scratch resistance (AC3 ≥ 3.5 N, BS-EN 14323:2021[5]), small ball (AC3 ≥ 10 mm, BS-EN 13329:2023[4]), and cure properties of the A and B product types (Table 3) have been determined.

Table 3

## The experimental design of products

Product type	Decor paper		Overlay paper	
	Raw mass (g/m <sup>2</sup> )	Final mass (g/m <sup>2</sup> )	Mass (g/m <sup>2</sup> )	Final mass (g/m <sup>2</sup> )
A1	40	105	18	90
A2		115		
A3		105	22 (control)	
A4		115		
B1	50	115	18	90
B2		125		
B3		115	22 (control)	
B4		125		

*Abrasion Resistance.* The 10×10cm-sized samples have been prepared for the abrasion test. The centre has been drilled in each of them. As seen in Fig. 1, Taber 5155 abraser (Taber Industries, North Tonawanda, NY, USA) has been used for accelerated wear testing to determine abrasion resistance. Taber abrasive wheels covered with 100-grit sandpaper have been applied to each sample surface. The sample surface has been controlled every 100 turns. At the end of 200 tours, the sandpapers have been replaced with the new ones. Abrasion resistance (AR) has been determined using Eq. 1.

$$AR = \frac{(IRP + FRP)}{2}, \quad (1)$$

where  $AR$  is the abrasion resistance (revolutions);  $IRP$  and  $FRP$  are the initial and full removal of the pattern, respectively.



Fig. 1. The abrasion test

*Scratch Resistance.* Erichsen Scratch Hardness Tester 413 (Erichsen GmbH & Co.Kg. Hemer, Germany) has been used to determine scratch resistance. As can be seen in Fig. 2, the 10×10cm samples with a hole in the centre have been mounted on a rotating table, and load (from 3 to 6 by 0.5 N increments) has been applied to the surface by a diamond tip attached to the load arm till scratch has become continuous. The test has been finished and the load determined when continuous scratches (1 mm gaps between the scratch lines) have been observed.



Fig. 2. The scratch resistance test

*Small Ball Test.* As can be seen in Fig. 3, a small ball impact tester mounted on the sample surface has been used to determine the impact resistance of laminate floor products. The thimble has been increased by 0.5 N increments to determine the maximum force at which no damage has occurred on the surface while the ball has been released. Following each drop, the surface has been checked and marked to ensure the presence of the damage.



Fig. 3. The small ball test ( $AC3 \geq 10$  mm, BS-EN 13329+A1 [4])

*Cure Test.* The curing performance of the samples has been evaluated using 37 % hydrochloric acid (HCl) and Rhodamine B. A drop of the solution has been distilled to the surface, left for five minutes, and then cleaned. The coloration (pink tones) of the surface has been observed. It has been desired that the surface had no visible pink color (Fig. 4) on the surface which corresponds to the 5<sup>th</sup> degree. An increase in pink color tones on the surface leads to the 1<sup>st</sup> degree which is not acceptable.

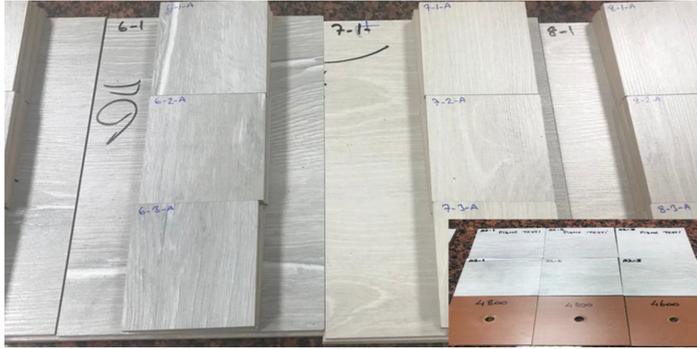


Fig. 4. The cure test samples

*Results and Discussion*

The surface abrasion range of the products has varied from 3400 to 4800 revolutions, and the means ranged from 3600 to 4733 revolutions, as can be seen in Table 4 and Fig. 5, respectively. According to BS-EN 13329 [4], all product types meet the abrasion class (AC) 3 and values are in harmony with Kara et al. [12, 13].

Table 4

**The test results**

Products	SA (AC3 ≥ 2000 rev.) (BS-EN 13329 [4])			AR (AC3 ≥ 3.5 N) (BS-EN 14323 [5])			IR, Small Ball (AC3 ≥ 10 mm) (BS-EN 13329 [4])	Cure (1–2–3–4–5)		
	Left	Center	Right	Left	Center	Right	Center	Left	Center	Right
A1	3,400	4,800	4,400	5	5	4.5	110	5	5	5
A2	4,800	4,800	4,600	4.5	4.5	5	130	5	5	5
A3	4,300	4,600	3,600	4.5	4.5	4.5	120	5	5	5
A4	4,000	4,200	4,400	5	5	4.5	120	5	5	5
B1	4,200	4,200	3,600	5	5	5	110	5	5	5
B2	4,400	4,800	4,400	5	5	5	120	5	5	5
B3	4,000	4,400	4,000	5	4.5	4.5	120	5	5	5
B4	3,600	3,600	3,600	4.5	4.5	4.5	110	5	5	5

The averages and changes in surface abrasion are illustrated in Fig. 5. For A type products, when the final mass of the décor paper has increased from 105 to 115 g/m<sup>2</sup>, 12.7 % (A1 vs A2) and 0.8 % (A3 vs. A4) increases in surface abrasion have been observed for 90 and 95 g/m<sup>2</sup> overlay final mass groups, respectively. Therefore, the advance in surface abrasion has almost been zeroized when the overlay final mass has increased from 90 to 95 g/m<sup>2</sup>. For B type products, a 13.3 % increase (B1 vs B2) and 12.9 % decrease (B3 vs. B4) have been observed within the 90 and 95 g/m<sup>2</sup> overlay paper groups, respectively, when the décor paper final mass has increased from 115 to 125 g/m<sup>2</sup>. Within the same décor paper final mass, an increase in the overlay paper final mass (90 to 95 g/m<sup>2</sup>) has caused –0.8 % (A1 vs. A3), –11.3 % (A2 vs. A4), 3.3 % (B1 vs. B3), and –20.6 % (B2 vs. B4) alterations in surface abrasion. When comparing the product types in the same décor and overlay paper masses, surface abrasion of the B1 and B3 have been 15.5 and 1.6 % lower than A2 and A4, respectively. As can

be seen in Table 2, the impregnation process parameters have been the same. However, even if the 1.6 % difference can be neglected, the reason for the 15.5 % difference has not been normal and is associated with 2 essential differences between the A and B types of products such as 10 g/m<sup>2</sup> excess of the décor paper raw mass and the fiber types.

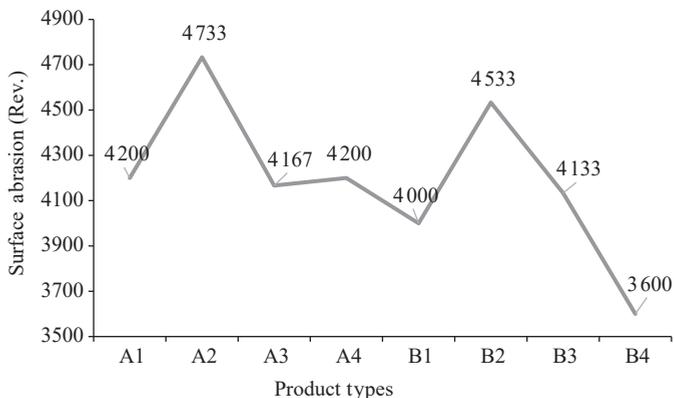


Fig. 5. The surface abrasion alterations

The averages and changes in abrasion resistance are illustrated in Fig. 6. For A type products, AR 3.4 % has decreased (A1 vs. A2) and 7.4 % has increased (A3 vs. A4) when the décor paper final mass has increased from 105 to 115 g/m<sup>2</sup> while the overlay paper final mass has been 90 and 95 g/m<sup>2</sup>, respectively. Also, a 6.9% decrease (A1 vs. A3) and a 3.6 % increase have been observed when the overlay paper final mass has increased from 90 to 95 g/m<sup>2</sup> while the décor paper final mass has been 105 and 115 g/m<sup>2</sup>, respectively. However, as can be seen in Table 4, AR of A1 and A4 are equal, and improving the décor and overlay papers' final masses has not provided any improvement. For B type products, an increase in the overlay paper final mass has caused adverse effects (–6.7 % for B1 vs. B3 at 115 g/m<sup>2</sup> and –10 % for B2 vs. B4 at 125 g/m<sup>2</sup>). AR has not changed and has decreased by 3.6% when the décor paper final mass has increased from 115 to 125 g/m<sup>2</sup> for the 90 and 95 g/m<sup>2</sup> overlay paper final mass, respectively. When A and B type products are compared considering the same décor and overlay paper masses (115 and 90 g/m<sup>2</sup> for décor and overlay, respectively), a 7.1 % increase (A2 vs. B1) and a 3.4 % decrease (A4 vs. B3) have been observed in AR. Therefore, a stable improvement in terms of paper mass has not been generally achieved.

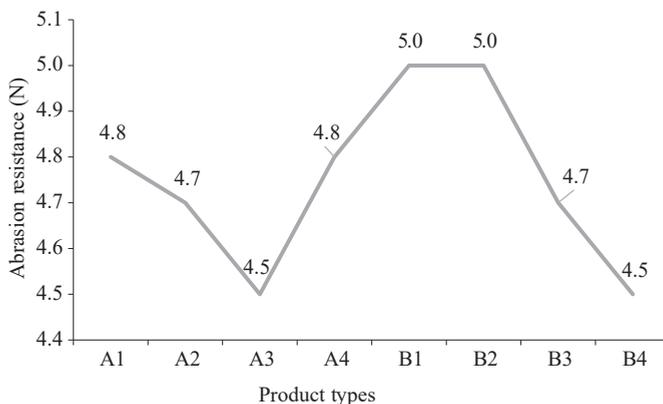


Fig. 6. The abrasion resistance alterations

Bardak et al. [2] have evaluated the influence of décor paper grammage (80.15 to 130.03 g/m<sup>2</sup>) on AR of particleboards and have stated that an increase in mass provides advancement in AR. An increase in density with an increase in mass which decreases the pore amount of the décor paper by impregnation to holes is attributed to the AR improvements as Bardak et al. [2] have expressed.

Nemli et al. [16] have stated that when the grammage of the melamine paper, used to cover particleboards, increases from 70 to 100 g/m<sup>2</sup>, significant improvements are observed on modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and thickness swell (TS) (24h). Remarkable increases in density as seen in Bardak et al. [2] are assumed as one of the main factors that cause improvements in the properties.

It has also been reported that abrasion has decreased with an increase in the overlay paper final mass at 23 g/m<sup>2</sup> corundum amount. But when the corundum amount has increased to 28 g/m<sup>2</sup>, a more than 4 % decrease has been reported by Kara et al. [12]. In this study, oscillations are the fact instead of general increase or decrease behaviors.

The averages and changes in impact resistance (IR) are presented in Table 4. For A type products, IR has increased by 18.2 % (A1 vs. A2) and has not changed (A3 vs. A4) when the décor paper final mass has increased from 105 to 115 g/m<sup>2</sup> while the overlay paper final mass has been 90 and 95 g/m<sup>2</sup>, respectively. Furthermore, IR has increased by 9.1 % (A1 vs. A3) and has decreased by 7.7 % (A2 vs. A4) when the overlay paper final mass has increased from 90 to 95 g/m<sup>2</sup> while the décor paper final mass has been 105 and 115 g/m<sup>2</sup>, respectively. For B type products, an increase in the overlay paper final mass has provided a 9.1 % improvement for B1 vs B3 at 115 g/m<sup>2</sup> and a –8.3 % worsening for B2 vs B4 at 125 g/m<sup>2</sup>). The same improvement and worsening are valid when the décor paper final mass has increased from 115 to 125 g/m<sup>2</sup> for the 90 and 95 g/m<sup>2</sup> overlay paper final mass groups (B1 vs B2 and B3 vs B4), respectively. When A and B type products have been compared considering the same décor and overlay paper masses (115 g/m<sup>2</sup> and 90 g/m<sup>2</sup> for the décor and overlay ones, respectively), A4 and B3 have not presented numerical difference while a –15.4 % decrease has been observed for A2 vs. B1.

Kara et al. [13] have noted 20 to 25.25 N IR of the laminate flooring which has been determined by a large diameter ball test. In the literature, there are scarcely any studies for the comparison. However, the results of this study fit the standard requirements.

As can be seen in Table 4, no numerical differences have been observed in cure properties within and between the groups. As for IR, the results of this study have not been sufficient compared to the literature due to the lack of reported values. It may be thought that the discussion of the results is insufficient. However, when the literature is reviewed, laminate floor properties evaluated in this study are limited to a few studies that have already been mentioned. Therefore, industrially produced laminate floor products should be further studied for detailed evaluation.

Sıradağ [20] has stated that extending the storage duration can reduce (up to 15 % after 2 years of conditioning) the free formaldehyde amount of laminate floorings. However, the influence of such a storing time on the physical and mechanical properties of laminate flooring with HDF core has not been reported. However, Çamlıbel and Aydın [6] have reported that 3 days of conditioning before the tests has provided around 1 and 1.4 % increases in MOE and surface soundness of the particleboards while a 3.5 % decrease in water absorption (WA). However, neither short nor long periods of storage influence on the properties have been the aim of this study.

It has been expressed that laminate flooring is sometimes considered as inferior to natural flooring materials, even though many of its qualities are objectively superior [18]. Besides the outstanding physical and mechanical performance, perceptual salience is one of the prominent features of the laminate floorings as an aesthetic product.

In this study, production variables have been limited, and consistent changes in the features have not been observed. Therefore, further experimental designs (3–5 grammage groups for each layer) should be evaluated to better understand the influence of the final grammage of the décor and overlay paper on the product features.

### Conclusion

The influence of the décor and overlay paper final mass on abrasion, impact, and cure properties of laminate floor products produced in industrial conditions has been figured out. Considering the standards, products meet the requirements of the commercial market. However, at this stage, behavioral stability of the influence of paper mass on the properties is not the fact when overall results are taken into consideration.

### REFERENCES

1. Arenas J.P., Sepulveda L.F. Impact Sound Insulation of a Lightweight Laminate Floor Resting on a Thin Underlayment Material Above a Concrete Slab. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 45, art. no. 103537. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103537>
2. Bardak S., Sarı B., Nemli G., Kırcı H., Baharoğlu, M. The Effect of Decor Paper Properties and Adhesive Type on Some Properties of Particleboard. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, vol. 31, iss. 6, pp. 412–415. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.02.008>
3. Borrell J.M.G., Alcaraz J.G.S., Sanchis E.J. Experimental and Numerical Acoustic Characterization of Laminated Floors. *Experimental Techniques*, 2016, vol. 40, pp. 857–863. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0086-9>
4. *BS-EN 13329:2023. Laminate Floor Coverings. Specifications, Requirements and Test Methods*. London, BSI, 2023. 24 p.
5. *BS-EN 14323:2021. Wood-Based Panels. Melamine Faced Boards for Interior Uses. Test Methods*. London, BSI, 2021. 26 p.
6. Çamlıbel O., Aydın M. The Effects of Continuous Press Speed and Conditioning Time on the Particleboard Properties at Industrial Scale. *BioResources*, 2022, vol. 17, iss. 1, pp. 159–176. <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.159-176>
7. İstek A., Aydemir D., Aksu S. The Effect of Décor Paper and Resin Type on the Physical, Mechanical, and Surface Quality Properties of Particleboards Coated with Impregnated Décor Papers. *BioResources*, 2010, vol. 5, iss. 2, pp. 1074–1083. <https://doi.org/10.15376/biores.5.2.1074-1083>
8. İstek A., Özlüsoyulu İ., Özel F., Yazıcı H. Problems in Laminate Parquet Applications. *Proceedings of the III International Mediterranean Forest and Environment Symposium*. Kahramanmaraş Sütçü İmam University, 2019, pp. 633–636.
9. Jiménez P., Dunkl A., Eibel K., Denk E., Grote V., Kelz C., Moser M. Evaluating Psychological Aspects of Wood and Laminate Products in Indoor Settings with Pictures. *Forest Products Journal*, 2015, vol. 65, iss. 5–6, pp. 263–271. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00003>

10. Jiménez P., Dunkl A., Eibel K., Denk E., Grote V., Kelz C., Moser M. Wood or Laminate?—Psychological Research of Customer Expectations. *Forests*, 2016, vol. 7, no. 11, art. no. 275. <https://doi.org/10.3390/f7110275>

11. Kalaycioglu H., Hizioglu S. Evaluation of Surface Characteristics of Laminated Flooring. *Building and Environment*, 2006, vol. 41, iss. 6, pp. 756–762. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.012>

12. Kara M.E., Ayrimlis N., Uncu A. Effect of Overlay Paper Properties on the Surface Quality of Laminate Flooring. *Machines. Technologies. Materials*, 2022, vol. 16, iss. 6, pp. 199–201.

13. Kara M.E., Yerlikaya Z., Ateş S., Olgun, Ç. Effect of Pressing Conditions on Some Surface Properties of HDF Laminate Parquets. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2016, vol. 23, pp. 274–278.

14. Nandipati M.R., Suman K.N.S. Improving Abrasion Resistance of Laminate Floor with Additional Curing Prior to Final Coating – An Experiment and SAS Program. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2021, vol. 6, iss. 12, pp. 780–784.

15. Nemli G. Factors Affecting Some Quality Properties of the Decorative Surface Overlays. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 195, iss. 1–3, pp. 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.001>

16. Nemli G., Yıldız S., Gezer E.D. Effects of Melamine Raw Paper Weight, Varnish Type and the Structure of Continuous Pressed Laminate (CPL) on the Physical, Mechanical Properties and Decay Resistance of Particleboard. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, vol. 56, iss. 3, pp. 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.07.002>

17. Roos A., Hugosson M. Consumer Preferences for Wooden and Laminate Flooring. *Wood Material Science and Engineering*, 2008, vol. 3, iss. 1–2, pp. 29–37. <https://doi.org/10.1080/17480270802573586>

18. Schütte S., Lindberg A., Eklund J. Subjective Assessment of Laminate Flooring. *Contemporary Ergonomics*. London, Taylor & Francis, 2006, pp. 194–198. <https://doi.org/10.1201/9781003072072-45>

19. Seo J., Jeong S.-G., Kim S., Huh W. Improvement of Thermal Conductivity of Underlay Foam for Laminate Flooring to Reduce Heating Energy. *BioResources*, 2016, vol. 11, iss. 4, pp. 9059–9067. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.9059-9067>

20. Siradağ H. *Free Formaldehyde Change in Laminate Parquet Depending on the Waiting Time*: Master’s Thesis. Turkey, Bartın, Bartın University, 2019. 273 p. (In Turk.).

21. Wilson J., Cunefare K. Sound Quality of Laminate Flooring Systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, vol. 24, iss. 4\_Supplement, art. no. 2441. <https://doi.org/10.1121/1.4782562>

22. Yetiş C., Tuna Kayili M. Determination of the Effect of Laminate Flooring on Indoor Air Quality during the Installation Phase of the Building. *Journal of International Environmental Application and Science*, 2021, vol. 16, iss. 4, pp. 140–148.

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

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

Научная статья

УДК 674.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-183-199

## Физико-механические свойства композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы

С.Н. Казизин<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4220-5488>

Д.В. Василишин<sup>1</sup>, ассистент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9293-5900>

А.В. Шишмарева<sup>1</sup>, канд. экон. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9193-3687>

В.Д. Ворончихин<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4176-861X>

А.А. Тамби<sup>2</sup>, д-р техн. наук; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; sergeikaz060890@yandex.ru, ameteras008@gmail.com, shishmareva\_anna@bk.ru, voronchikhinvd@mail.sibsau.ru

<sup>2</sup>Ассоциация производителей машин и оборудования лесопромышленного комплекса «ЛЕ-СТЕХ», ул. Новопроложенная, д. 11, г. Всеволожск, Россия, 188642; a\_tambi@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.24 / Одобрена после рецензирования 24.08.24 / Принята к печати 27.08.24

**Аннотация.** В настоящее время состояние проблемы использования древесных отходов является критическим, поскольку традиционные способы их переработки не обеспечивают экономически обоснованного вовлечения в промышленное производство всего объема отходов. Для решения этой проблемы необходимо найти методы переработки древесных отходов, способные увеличить долю измельченной древесины, используемой в производстве востребованной продукции с высокой добавочной стоимостью. Целью настоящей работы является изучение влияния содержания активированных древесных частиц, измельченных гидродинамическим способом, на физико-механические свойства древесно-полимерных композитов на основе диацетата целлюлозы. Полимерную матрицу в виде диацетата целлюлозы и древесный наполнитель получали в лаборатории из гидродинамически активированных опилок березы. Образцы композитов для испытания механических свойств производили методом литья под давлением с использованием вертикальной литьевой машины. Анализ морфологии поверхностей композитов после испытаний осуществляли при помощи электронной микроскопии. Термическую деструкцию образцов диацетата целлюлозы и композитов оценивали методом термогравиметрического анализа. Ненаполненный диацетат целлюлозы показал минимальное водопоглощение (около 4 %). Водостойкость образцов композитов снижалась при повышении содержания наполнителя в диацетате целлюлозы. Увеличение количества древесного наполнителя в составе композиции до 20 % приводит к росту предела прочности при растяжении и модуля упругости до 23,0 МПа и 1,22 ГПа соответственно. Дальнейшее повышение содержания наполнителя с 30 до 70 % снижало эти два показателя. При увеличении содержания наполнителя с 10 до 70 % предел прочности при изгибе падал с 34,4 до 13,6 МПа. Рост доли древесного наполнителя в составе композита влечет снижение потери его массы при высокой температуре. Гидродинамически обработанные древесные частицы могут быть использованы в производстве композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы при их добавлении в количестве от 20 до 30 %.

© Казизин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Ворончихин В.Д., Тамби А.А., 2025



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

**Ключевые слова:** древесно-полимерный композит, гидродинамическая активация, опилки березы, ацетат целлюлозы, физико-механические свойства

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта № 20231105-06121 «Получение композиционных материалов на основе ацетата целлюлозы из механоактивированных древесных частиц» в соответствии с договором о предоставлении гранта № 695 от 21.12.2023 г.

**Для цитирования:** Казисин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Ворончихин В.Д., Тамби А.А. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе дицетата целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 183–199.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-183-199>

Original article

## Physical and Mechanical Properties of Composite Materials Based on Cellulose Diacetate

**Sergey N. Kazitsin**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4220-5488>

**Dmitry V. Vasilishin**<sup>1</sup>, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9293-5900>

**Anna V. Shishmareva**<sup>1</sup>, Candidate of Economics; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9193-3687>

**Vasili D. Voronchikhin**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4176-861X>

**Alexander A. Tambi**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; sergeikaz060890@yandex.ru, ameteras008@gmail.com, shishmareva\_anna@bk.ru, voronchikhinvd@mail.sibsau.ru

<sup>2</sup>Timber Industry Machinery and Equipment Producers Association «LESTECH», ul. Novoprolozhennaya, 11, Vsevolozhsk, 188642, Russian Federation; a\_tambi@mail.ru<sup>✉</sup>

Received on May 22, 2024 / Approved after reviewing on August 24, 2024 / Accepted on August 27, 2024

**Abstract.** Currently, the state of the problem of wood waste use is critical, since traditional methods of its processing do not provide economically justified involvement of the entire volume of waste in industrial production. To solve this problem, it is necessary to find methods for processing wood waste that increase the share of crushed wood used in the production of high-value-added products in demand. The aim of this work has been to study the effect of the content of activated wood particles crushed by a hydrodynamic method on the physical and mechanical properties of wood-polymer composites based on cellulose diacetate. A polymer matrix in the form of cellulose diacetate and wood filler has been obtained in the laboratory from hydrodynamically activated birch sawdust. Composite samples for testing mechanical properties have been produced by injection molding using a vertical injection molding machine. The morphology of the composite surfaces after the tests has been analyzed using electron microscopy. Thermal degradation of cellulose diacetate samples and composites has been assessed using thermogravimetric analysis. Unfilled cellulose diacetate has shown minimal water absorption (about 4 %). The water resistance of the composite samples has decreased with increasing filler content in cellulose diacetate. An increase in the amount of wood filler in the composition to 20 % leads to an increase in the tensile strength and modulus of elasticity to 23.0 MPa and 1.22 GPa, respectively.

A further increase in the filler content from 30 to 70 % has reduced these two indicators. With an increase in the filler content from 10 to 70 %, the flexural strength has dropped from 34.4 to 13.6 MPa. An increase in the proportion of wood filler in the composite composition leads to a decrease in its mass loss at high temperatures. Hydrodynamically treated wood particles can be used in the production of composite materials based on cellulose diacetate when added in amounts from 20 to 30 %.

**Keywords:** wood-polymer composite, hydrodynamic activation, birch sawdust, cellulose acetate, physical and mechanical properties

**Acknowledgements:** The research was supported by the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the project no. 20231105-06121 “Production of Composite Materials Based on Cellulose Acetate from Mechanically Activated Wood Particles” in accordance with the grant agreement no. 695 dated 21.12.2023.

**For citation:** Kazitsin S.N., Vasilishin D.V., Shishmareva A.V., Voronchikhin V.D., Tambi A.A. Physical and Mechanical Properties of Composite Materials Based on Cellulose Diacetate. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 183–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-183-199>

### *Введение*

Следование человечества концепции устойчивого развития экономики обусловлено необходимостью решения экологических проблем, в т. ч. вызванных применением полимеров из ископаемого сырья [16, 28]. Синтетические полимеры на основе нефтепродуктов очень медленно разрушаются в окружающей среде, этот процесс может занимать сотни лет. В результате многочисленные пластиковые отходы уже накопились в земле, океанах и атмосфере. Научные исследования, проведенные за последние десятилетия, позволили найти решение данной проблемы – применять в повседневной жизни экологически чистые биополимеры, такие как полимолочная кислота (PLA), полигидроксibuтират (PHB), полигидроксиалканоаты (PHA) и ацетат целлюлозы (CA), и создавать полимерные композиты, не наносящие вред окружающей среде и подлежащие переработке или утилизации [35].

Ацетат целлюлозы представляет собой биоразлагаемый полимер, получаемый из возобновляемых источников, например из древесины или хлопкового волокна, путем частичного ацетилирования целлюлозы. Ацетат целлюлозы при компостировании не выделяет опасных продуктов разложения, а также обладает высокими механическими свойствами.

Среди биоразлагаемых полимеров ацетат целлюлозы наиболее широко используется при изготовлении биопластиков, упаковочных материалов, в биомедицине, в мембранных фильтрах и др. [20, 25]. В зависимости от степени замещения выделяют триацетат целлюлозы – от 60 до 61,5 % связанной уксусной кислоты и вторичный ацетат (диацетат – ДАЦ), содержащий от 54 до 56 % этой кислоты [1].

Степень замещения оказывает влияние на свойства ацетата целлюлозы. Так, в работе [14] отмечается, что повышение степени ацетилирования целлюлозы с 1,81 до 2,41 приводит к увеличению плотности и твердости этролов, а также к снижению их водопоглощения и степени биоразложения.

N. Španić с соавторами [46] исследовали свойства биокompозитов на основе ацетата целлюлозы. В качестве сырья для получения данного материала и напол-

нителем были использованы древесина белой ивы и черной ольхи, измельченная до размеров частиц от 0,5 до 1 мм. Авторы установили разницу между прочностью при растяжении в зависимости от породы древесины: показатель для ацетата целлюлозы из черной ольхи составил 58,7 МПа, из белой ивы – 64,1 МПа. Ученые связывают такой результат со степенью замещения, которая различна для изучаемых ацетатов целлюлозы (ацетат из белой ивы имел степень замещения 2,32, а из черной ольхи – 2,73).

Авторы исследования [44] выявили, что максимальные предел прочности при растяжении 65 МПа и модуль Юнга 2,5 ГПа достижимы при добавлении 5 % целлюлозных нановолокон, выделенных из рисовой соломы в матрицу на основе ацетата целлюлозы.

Li и др. [31] изучали способ получения композитов на основе ацетата целлюлозы (степень замещения – 2,45) с добавлением волокон мискантуса методом 2-этапной экструзии. Предложенный способ позволил получить композит с прочностью на разрыв 64 МПа и модулем при растяжении 4,7 ГПа при 25 % механически фибриллированных волокон мискантуса в составе.

Чистый ацетат целлюлозы является хрупким материалом и нуждается в модификации, например, с помощью пластификаторов и армирующих частиц [22].

Натуральные растительные волокна из возобновляемого сырья обладают рядом преимуществ, таких как улучшенная биоразлагаемость, невысокая стоимость, устойчивость к истиранию, хорошая удельная прочность, низкая плотность и т. д. Введение в полимерную матрицу твердых дисперсных или волокнистых натуральных растительных частиц осуществляется с целью изменения физико-химических, механических, термических, фрикционных и прочих свойств материалов, хотя, как правило, основной задачей является улучшение физико-механических свойств [7, 36].

Древесина нашла широкое применение как наполнитель в древесно-полимерных композитах, поскольку сырьем могут служить отходы деревообрабатывающей промышленности, что делает данный вид наполнителя сравнительно дешевым. Наряду с этим, древесный наполнитель улучшает свойства композитов [17]. Авторы работ [4, 11, 15] отмечают, что увеличение содержания в композиции древесных частиц повышает модуль упругости при сжатии [15], при статическом изгибе [11], а также твердость и прочность при растяжении [4].

Исследования механических свойств композитов на основе полигидроксисульфата с добавлением древесной муки березы марки 180 позволили сделать вывод о том, что содержание наполнителя 40 % дает композит с высокими механическими свойствами: прочность при растяжении – 23 МПа; модуль упругости – 2,36 ГПа [2].

Современные тенденции в области изготовления полимерных композитов привели к разработке полностью целлюлозных композитов. Целлюлоза выполняет функции как матрицы, так и встроенного волокнистого наполнителя [17, 46].

Форма наполнителя является одним из наиболее важных факторов, влияющих на механические свойства древесно-полимерного композита [33]. По результатам недавних исследований сообщалось, что древесно-полимерные композиты, содержащие древесные частицы с волокнистой структурой

на поверхности, полученной в результате механического измельчения имеют лучшие механические свойства, чем аналогичный материал без волокнистых структур [26, 42].

В ряде работ отмечается, что мокрое измельчение древесной муки значительно улучшает характеристики древесно-полимерных композитов. Влажное измельчение древесной муки может привести к разрушению структуры клеточных стенок с отслоением фибрилл на поверхностях древесных частиц. Это положительно сказывается на прочности при растяжении, ударной вязкости и усталостной долговечности получаемых композитов [19, 26].

При исследовании отбеленной сульфатной целлюлозы из хвойных пород древесины, изготовленной методом мокрого размола в шаровой мельнице [40], прочность при растяжении композита на основе полилактида была наибольшей в случае максимальной продолжительности размола, что соответствует наименьшим размерам армирующих частиц. Мокрое измельчение древесины в валковой мельнице описано в работе [24].

Таким образом, мокрое измельчение является перспективным направлением подготовки древесного наполнителя для композиционных материалов на основе биополимеров.

Проведенные ранее исследования [3] свидетельствуют о получении в процессе гидродинамической обработки древесных частиц, диспергированных до состояния волокнистого материала с фибриллированными поверхностями, пригодных для создания композиционных материалов. Таким образом, целью настоящей работы является изучение влияния содержания активированных древесных частиц, измельченных гидродинамическим способом, на физико-механические свойства древесно-полимерных композитов на основе ДАЦ.

### *Объекты и методы исследования*

В качестве основного сырья для выделения целлюлозы и получения наполнителя использовали опилки древесины березы, оставшиеся после распиловки круглых лесоматериалов на ленточнопильном станке МЛ3210 (ООО «Сибфорест», г. Красноярск), размер опилок – менее 2 мм.

Методика получения полимерной матрицы – ДАЦ из гидродинамически активированных опилок березы (рис. 1, а) с содержанием связанной уксусной кислоты 54,1–58,0 % основана на ацетилировании целлюлозы с применением в качестве катализатора серной кислоты [6]. Целлюлоза для ацетилирования была изготовлена азотнокислым методом из гидродинамически активированных опилок березы. Ацетилирование целлюлозы до ДАЦ осуществляли с использованием кетена как ацетилирующего агента в закрытой реакционной установке с кетеновой лампой. Ацетилирующий агент действует на подготовленную смесь из целлюлозы, активированной ледяной уксусной кислотой, в среде бензола и катализатора – серной кислоты. Ацетилирование длилось 3–4 ч при перемешивании.

По окончании процесса ацетилирования полученный продукт частично является сульфоацетатом, вследствие чего проводили нейтрализацию катализатора в реакционной смеси и стабилизацию для удаления сульфогрупп.

Стабилизированную реакционную массу фильтровали и отгоняли остатки бензола из ДАЦ.

Подготовка древесного наполнителя (дисперсных частиц) (рис. 1, б) включала гидродинамическую активацию опилок в течение 25 мин [18] с последующей лиофильной сушкой и измельчением [6].



Рис. 1. Внешний вид: а – диацетат целлюлозы; б – древесный наполнитель

Fig. 1. The appearance: а – cellulose diacetate; б – wood filler

*Изготовление древесно-полимерного композита.* Перед приготовлением композита древесные частицы и порошкообразный ДАЦ высушивали до постоянной массы при температуре  $95 \pm 5$  °С. Уменьшение температуры сушки ниже 100 °С связано с исключением риска разложения ДАЦ при температуре выше 100 °С.

Образцы из чистого ДАЦ и биокомпозиты были приготовлены для испытаний методом литья без давления в растворитель (ацетон). ДАЦ  $20 \pm 0,02$  г растворяли в стеклянном лабораторном стакане, в который добавляли  $101 \pm 0,1$  мл ацетона до получения 20%-го раствора. Для растворения ДАЦ и диспергирования частиц наполнителя использовали верхнеприводную мешалку US-2000А.

Приготовленные смеси разливали в стеклянные чашки Петри. Композиты готовили путем добавления различного количества наполнителя к уже растворенному ДАЦ и помещения смесей в чашки Петри [21, 27, 29]. Получение монолитных образцов композитов с содержанием древесных частиц более 70 % невозможно по причине недостатка связующего. Растворенный ДАЦ и композитные смеси оставляли в чашках Петри при комнатной температуре до полного испарения растворителя в течение 3 сут. Контроль полноты испарения растворителя осуществляли весовым методом.

Полученные таким образом материалы предварительно измельчали в мельнице Biolomix 800G (BioloMix, Китай). Образцы композитов для испытания механических свойств в форме прямоугольной полоски по ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010) и 2-сторонней лопатки по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527-2:2012) изготавливали с использованием вертикальной литьевой машины BORX-40 (Shenzhen Borx Technology Co., Ltd., Китай) с последующим охлаждением до комнатной температуры. Размеры образцов в форме 2-сторонней лопатки составляли около  $80 \times 5 \times 4$  мм, прямоугольных –  $80 \times 10 \times 4$  мм.

Все образцы кондиционировали при температуре 20 °С и относительной влажности 65 % в продолжение 1 недели перед каждым испытанием.

Содержание влаги в образцах композитов составляло  $0,5 \pm 0,05$  %. Условное обозначение образцов композита в зависимости от количества древесных частиц 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 % – W10, W20, W30, W40, W50, W60 и W70 соответственно.

*Механические свойства древесно-полимерного композита.* Анализ морфологии поверхностей поперечного сечения образцов композитов после испытаний на растяжение и изгиб проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) (Hitachi TM4000Plus, Япония). Для образцов композитов не предусматривали дополнительную пробоподготовку. Композиты были закреплены на алюминиевых заглушках. Наблюдение осуществляли при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Водопоглощение определено в соответствии с ГОСТ 4650–2014 (ISO 62:2008).

Прочность образцов на растяжение и модуль упругости фиксировали с помощью универсальной испытательной машины (УТС-110МН-30-0У, Testsystems, Россия) при постоянной скорости перемещения траверсы 2 мм/мин в соответствии с ГОСТ 11262–2017. Определение прочности образцов композитов на изгиб и модуля упругости при изгибе проводили со скоростью испытания 5 мм/мин по ГОСТ 4648–2014.

Термогравиметрическое исследование выполняли с помощью прибора STA 449 F1 Jupiter (Netzsch, Германия) в корундовых тиглях в интервале температур от 30 до 900 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин в потоке аргона (скорость потока защитного и продувочного газов – 20 и 50 мл/мин соответственно). Для испытаний использовали образцы массой  $12 \pm 0,3$  мг. Обработка результатов измерений выполнена с помощью пакета программ Netzsch Proteus Thermal Analysis 5.1.0, поставляемого с прибором.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Влияние содержания древесных частиц, активированных гидродинамической обработкой, на поверхность поперечного сечения образца композита после испытаний на изгиб и растяжение исследовали методом SEM. На рис. 2 представлены SEM-микрофотографии поверхности разрушения композита – ненаполненного и наполненного древесными частицами.

SEM-изображения показывают, что древесные частицы были хорошо диспергированы в полимере матрицы в образцах W10–W40, что позволяет достичь однородности композита. На рис. 2, б–д видны древесные частицы, многие из которых разрушены у поверхности образца. На поверхности разрушения рис. 2, б–г более четко различимы отдельные расслоения стенок клеток вдоль армирующих элементов (фибрилл), произошедшие вследствие анизотропии физико-механических свойств древесины.

Установленный характер разрушения согласуется с результатами работы [43], в которой авторы указывают на улучшение механических свойств древесно-полимерного композита на основе полилактида при добавлении древесных частиц. В статье содержится утверждение, что морфология поверхности разрушения композита свидетельствует скорее о разрыве волокна, чем о его вытягивании, это является доказательством совместимости полимерной матрицы и древесного наполнителя, а также адгезии между ними.

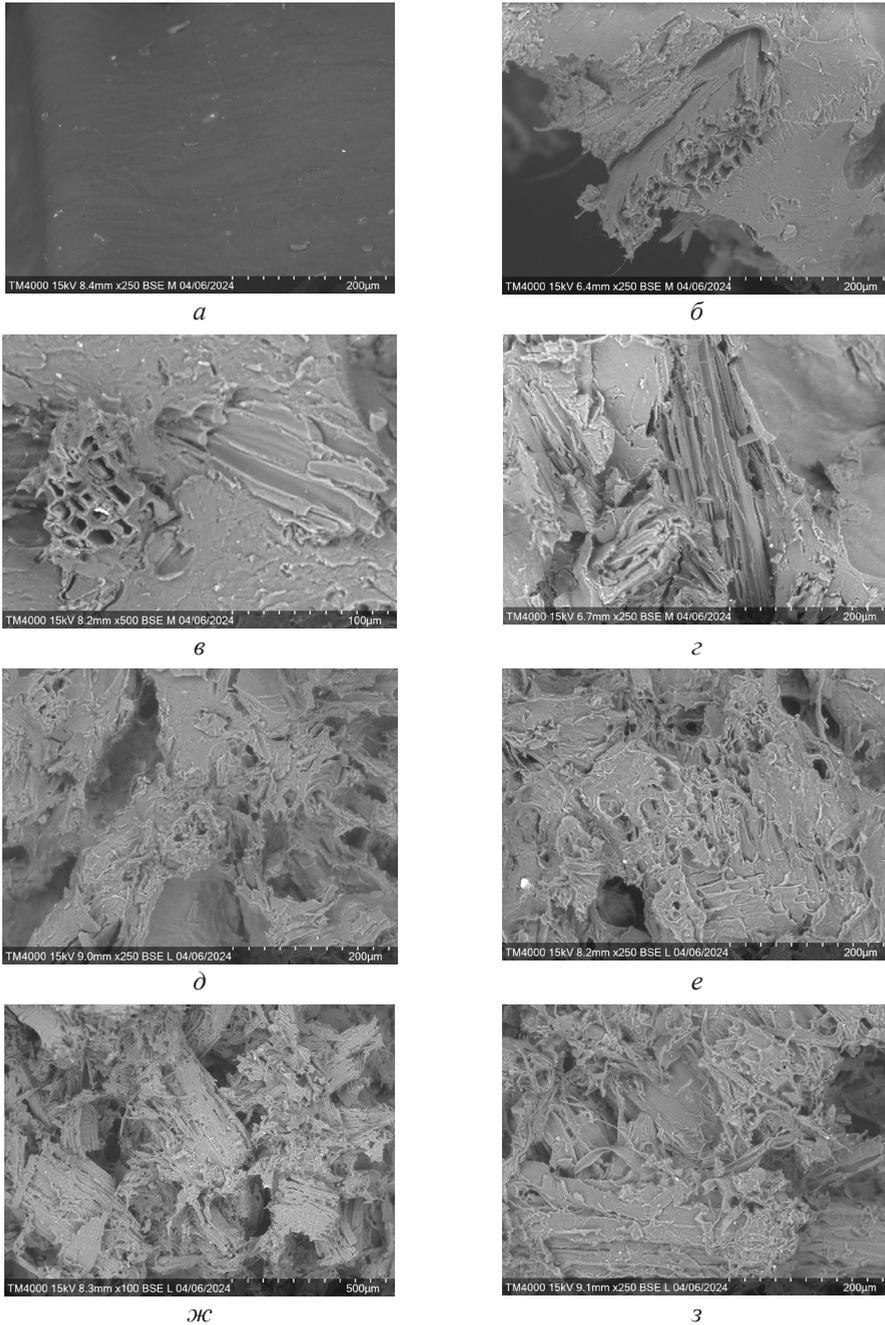


Рис. 2. Микрофотографии поперечного сечения образцов: *a* – диацетат целлюлозы; *б* – W10; *в* – W20; *г* – W30; *д* – W40; *е* – W50; *ж* – W60; *з* – W70

Fig. 2. The micrographs of the cross-section of the samples: *a* – cellulose diacetate; *б* – W10; *в* – W20; *г* – W30; *д* – W40; *е* – W50; *ж* – W60; *з* – W70

Согласно полученным результатам, гидродинамически обработанные древесные частицы играют важную роль в формировании механических свойств композита, осуществляя передачу напряжений на полимерную матрицу. Процесс фибриллирования наполнителя [6] в ходе гидродинамической обработки способствует повышению степени межфазного взаимодействия между

матрицей ДАЦ и древесными частицами [26, 33]. При добавлении 20 % наполнителя предел прочности при растяжении увеличился в сравнении с ненаполненным ДАЦ. Кроме того, в работе [37] было выдвинуто предположение, что гидрофобный лигнин, присутствующий в древесных частицах, обуславливает адгезионное взаимодействие с биополимерной матрицей.

В образцах W50–W70 по мере увеличения содержания наполнителя в композите наблюдалась агломерация древесных частиц и, как следствие, образование пустот в структуре материала. При этом прочностные свойства композитов резко снижаются [2].

Влияние количества древесных частиц в композите на водопоглощение образцов показано на рис. 3. Ненаполненный ДАЦ имел минимальное водопоглощение (около 4 %). Водостойкость образцов композитов значительно снижалась при росте содержания наполнителя в ДАЦ. При увеличении содержания наполнителя с 50 до 70 % водопоглощение композитов повысилось особенно резко – с 8,3 до 11 %. Это можно объяснить отрицательным влиянием гидрофильных свойств древесины, а также образованием микрополостей в композитах (рис. 2, е–з).

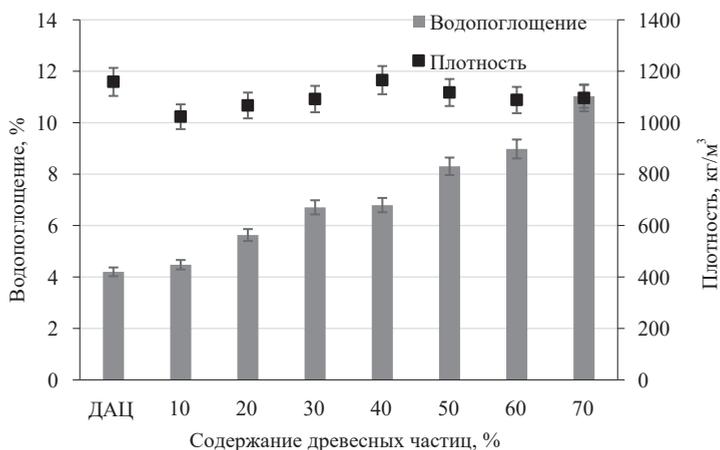


Рис. 3. Влияние содержания древесных частиц в композите на водопоглощение и плотность образцов

Fig. 3. The effect of wood particle content in the composite on water absorption and density of the samples

На рис. 4, а отражено влияние содержания древесных частиц на предел прочности при растяжении композитов. Этот показатель и модуль упругости ненаполненного ДАЦ равняются 19,5 МПа и 1,29 ГПа соответственно. Введение в состав композита 10 % древесных частиц способствует незначительному снижению названных значений в сравнении с показателями исходного ДАЦ [2]. Увеличение количества древесного наполнителя в составе композиции до 20 % позволяет повысить предел прочности при растяжении и модуль упругости до 23,0 МПа и 1,22 ГПа соответственно. Дальнейший рост содержания наполнителя с 30 до 70 % снижал предел прочности при растяжении (6,20 МПа) и модуль упругости (0,22 ГПа). По сравнению с ненаполненным ДАЦ более низкая прочность при растяжении композитов с высоким содержанием наполнителя может быть объяснена снижением количества ДАЦ, который выступал в качестве связующего для наполнителя в композите.

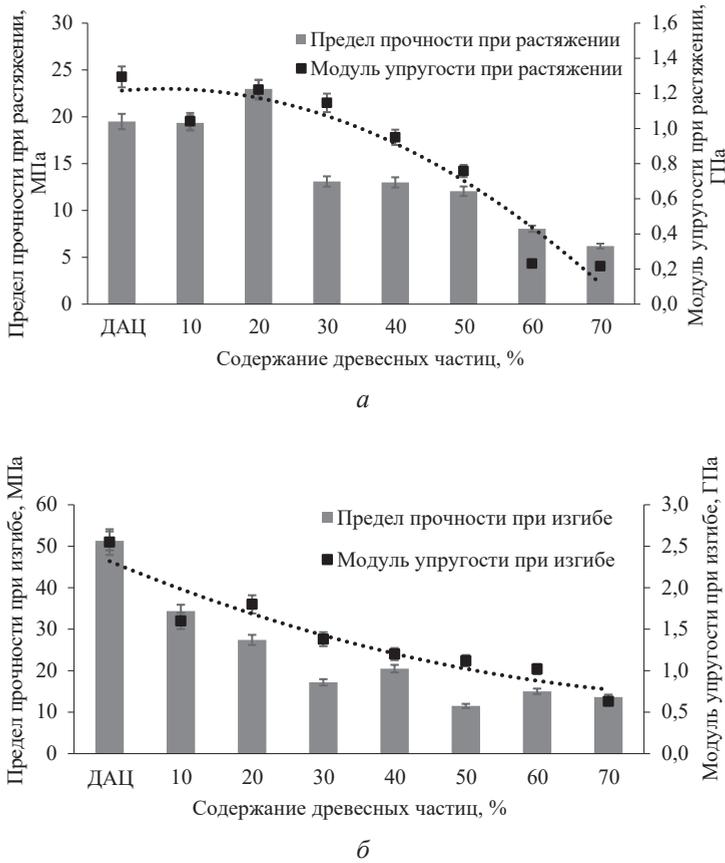


Рис. 4. Влияние содержания древесных частиц на прочность композитов:  
*а* – при растяжении; *б* – при изгибе

Fig. 4. The effect of wood particle content on the strength of composites:  
*a* – under tension; *b* – under bending

На SEM-изображении на поверхности излома образца композита наблюдали волокнистые элементы клеточной стенки древесных частиц, вероятно, вследствие адгезионной связи между наполнителем и ДАЦ-матрицей.

Явление механической блокировки объясняет адгезию, когда матрица проникает в поры, отверстия и щели или другие неровности основы и механически фиксируется на ней. Механическая блокировка происходит между матрицей и шероховатой поверхностью натурального волокна [30]. Если поверхность более шероховатая, то увеличивается площадь связывания между матрицей и наполнителем, а значит, повышается прочность связи в области раздела фаз [23, 32].

На рис. 4, *б* показано влияние содержания древесных частиц на предел прочности при изгибе композитов. Предел прочности при изгибе и модуль упругости ненаполненных древесными частицами образцов составили 51,3 МПа и 2,55 ГПа соответственно. При увеличении содержания наполнителя с 10 до 70 % предел прочности при изгибе снизился с 34,4 до 13,6 МПа [15]. Образцы с содержанием древесных частиц 70 % обладали самым низким значением (13,6 МПа).

На рис. 5 приведены термогравиметрические и дифференциальные термогравиметрические кривые (ТГ и ДТГ) исследованных образцов ненаполненного ДАЦ и композиций с различным содержанием древесных частиц.

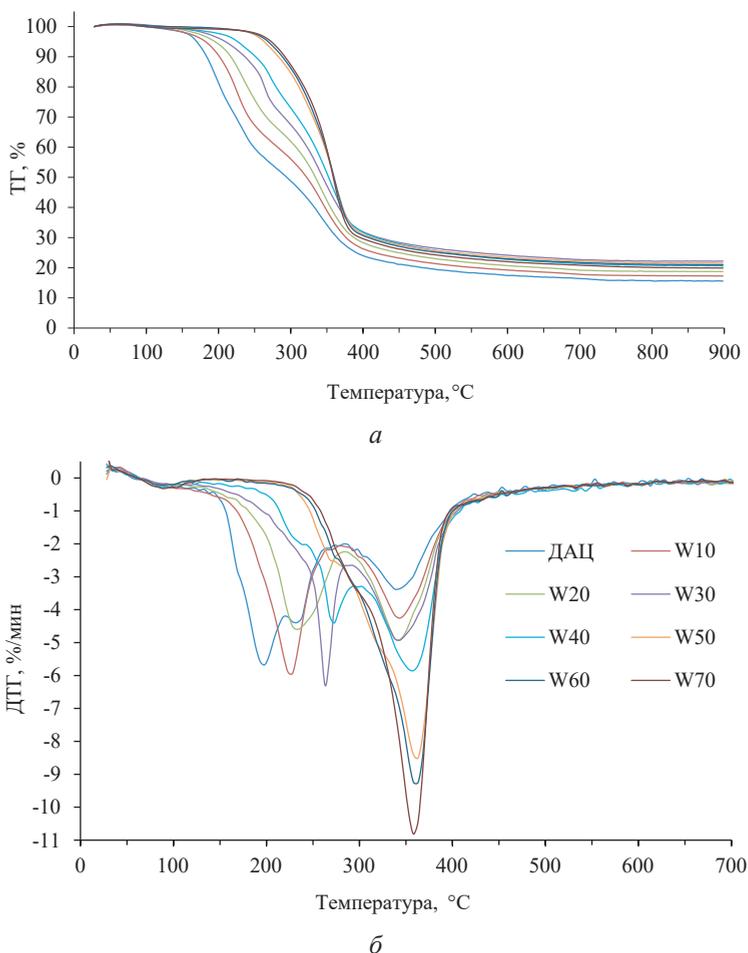


Рис. 5. Термогравиметрические кривые диацетата целлюлозы и композитов с различным содержанием древесных частиц: *a* – ТГ; *б* – ДТГ

Fig. 5. The thermogravimetric curves of cellulose diacetate and composites with different wood particle content: *a* – thermogravimetric curve; *б* – differential thermogravimetric curve

На графике ТГ (рис. 5, *a*) в температурном интервале до 160 °C изменение массы образцов из ненаполненного ДАЦ происходит за счет испарения сорбированной воды с частичным началом процессов деградации. С температуры 170–180 °C масса снижается за счет деградации с разделением на несколько температурных интервалов. При 160–250 °C медленно разлагается ацетат целлюлозы и быстро – сульфозамещенные ацетаты, образованные в результате действия катализатора (серной кислоты) на целлюлозу в ходе синтеза ацетата целлюлозы, которые не были полностью удалены на этапе нейтрализации [6, 9].

В диапазоне температур 250–330 °C снижение массы образца связано с разложением ацетата целлюлозы с формированием основной доли карбонильных и карбоксильных групп в продуктах деструкции. Суммарно основному разложению ацетата целлюлозы при 160–330 °C соответствует потеря 50–60 %

от всей массы исходного ацетата. При дальнейшем увеличении температуры в диапазоне 330–440 °С происходит уменьшение массы за счет деградации и разложения органических кислот и альдегидов, образовавшихся ранее [13].

На рис. 5, б пик ДТГ при температуре до 160 °С соответствует испарению влаги [12]. Деградация ацетата целлюлозы начинается в интервале температур 150–180 °С с разложения сульфозамещенных звеньев цепи, снижающих термостабильность ацетата [41].

Дальнейшая деградация ацетата целлюлозы сопровождается активным образованием карбонильных и карбоксильных групп в интервале температур 220–280 °С [5].

Увеличение скорости потери массы образца при температурах 330–440 °С связано с разложением продуктов деградации ацетата целлюлозы (кислоты, альдегиды и др.) и деградацией исходной целлюлозы [13].

Термическая стабильность древесно-полимерных композитов основана на термической деструкции главных компонентов древесного вещества наполнителя в виде гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина [38]. Термическая стабильность гемицеллюлоз в интервале температур 200–300 °С снижается из-за их аморфной структуры [47]. Для термического разложения целлюлозы необходима температура от  $\approx 350$  °С из-за кристаллической природы этого сырья [45]. Структура лигнина не похожа на структуру целлюлозы и гемицеллюлозы. Термическое разложение лигнина начинается при 300–500 °С [39].

Термодеструкция всех структурных компонентов полимера матрицы и древесинного вещества наполнителя в атмосфере аргона в отличие от окислительной среды происходит при температуре до 440 °С. Также было замечено, что увеличение количества древесного наполнителя в составе композита приводит к снижению потери его массы при высокой температуре – она составила 84,4 % (чистый ДАЦ) и  $79,8 \pm 1,7$  % (W10–W70), что может свидетельствовать об улучшении термостабильности за счет добавления наполнителя.

Деградация композита проходила в несколько стадий (рис. 5, б). Первый пик на кривой ДТГ можно объяснить испарением воды, содержащейся в композите, с его последующим разрушением. При добавлении древесных частиц в композит ДТГ-пики на графике смещались вправо по оси температур. Максимальная температура составляет 225, 232, 264, 267, 270 и 280 °С для W10, W20, W30, W40, W50, W60, W70 соответственно. Сдвиг пика ДТГ по оси температур показал улучшение термической стабильности композита, наполненного древесными частицами, вероятно, за счет углеродного остатка, который выступает в качестве изолирующего слоя, препятствующего дальнейшей термической деградации композита [34].

В ходе работы [10] был выполнен сравнительный анализ термических характеристик натуральных и подверженных гидродинамической активации древесных частиц. Авторы пришли к выводу, что гидродинамическая активация не изменяет структуру полимерной композиции древесного вещества, но оказывает заметное влияние на его морфолого-анатомическое строение. Композиты, наполненные древесными частицами от 50 до 70 %, в ходе испытаний показали похожие результаты по потере массы, свойственные для натуральной древесины [8].

Сводные данные ТГ анализа представлены в таблице.

**Результат термогравиметрического анализа образцов**  
**The result of thermogravimetric analysis of the samples**

Образец	ТГ			ДТГ	Зольный остаток после нагревания образца до 900 °С, %
	$T_{10}$	$T_{50}$	$T_{75}$	$T_{dmax}$	
ДАЦ	183	293	388	198	15,6
W10	203	323	413	228	17,3
W20	218	333	448	343	18,7
W30	233	343	553	263	22,2
W40	248	353	518	358	20,6
W50	283	358	523	363	21,5
W60	288	358	503	358	20,9
W70	293	358	473	358	19,9

Примечание:  $T_{10-75}$  – температура, при которой достигается потеря массы образца 10, 50 и 75 % от его исходной массы соответственно, °С;  $T_{dmax}$  – температура максимума на кривой ДТГ, °С.

### Выводы

1. Физико-механические свойства композитов зависят от содержания древесных частиц, измельченных гидродинамическим способом.
2. Предел прочности при растяжении композита существенно не изменяется при добавлении 10 % наполнителя в сравнении с ненаполненным диацетатом целлюлозы.
3. Внесение 20 % древесного наполнителя в состав композиции способствует увеличению прочности, однако дальнейший рост содержания наполнителя отрицательно сказывается на прочности при растяжении.
4. Малоиспользуемые мягкие отходы лесопильных и деревоперерабатывающих производств в виде опилок могут быть вовлечены в получение ацетата целлюлозы и композиционных материалов на его основе.
5. Гидродинамически обработанные древесные частицы целесообразно использовать при изготовлении композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы при их добавлении в количестве от 20 до 30 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаров В.И. Химия древесины и синтетических полимеров. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 620 с.  
Azarov V.I. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. 3rd ed., stereotyped. St. Petersburg, Lan' Publ., 2021. 620 p. (In Russ.).
2. Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф., Прокопьев А.А. Исследование физико-механических характеристик биокompозитов с наполнителем из древесной муки // Системы. Методы. Технологии. 2023. Т. 59, № 3. С. 94–99.  
Galyavetdinov N.R., Safin R.R., Ilalova G.F., Prokopiev A.A. Investigation of Physical and Mechanical Characteristics of Composites with Wood Flour Filler. *Sistemy. Metody.*

*Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 94–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-3-94-99>

3. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. Т. 371, № 5. С. 148–157.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Soft Wood Waste. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, vol. 371, no. 5, pp. 148–157. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.148>

4. Захаров П.С., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Исследование свойств наполненных ацетилцеллюлозных этролов // Вестн. технол. ун-та. 2020. Т. 23, № 2. С. 50–53.

Zakharov P.S., Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Properties of Filled Acetyl Cellulose Ethrols. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 50–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-8268-2023-1-32-36>

5. Зонova Н.В. Защитное действие металлоганических соединений применительно к волокнам и пленкам из ацетатов целлюлозы: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2005. 147 с.

Zonova N.V. *Protective Effect of Organometallic Compounds on Cellulose Acetate Fibers and Films*: Cand. Tech. Sci. Diss. Tyumen, 2005. 147 p. (In Russ.).

6. Казизин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Добрынкина Д.Д., Ворончихин В.Д. Исследование процесса получения ацетата целлюлозы из механоактивированных частиц березы // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 73–79.

Kazitsin S.N., Vasilishin D.V., Shishmareva A.V., Dobrynina D.D., Voronchikhin V.D. Research of the Process of Obtaining Cellulose Acetate from Mechanoactivated Birch Particles. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2024, vol. 42, no. 2, pp. 73–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-73-79>

7. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с. Lipatov Yu.S. *Physical Chemistry of Filled Polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 304 p. (In Russ.).

8. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесобразующих пород Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2015. № 6. С. 17–30.

Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal Analysis of Wood of the Main Tree Species of Central Siberia. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2015, no. 6, pp. 17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150602>

9. Нормакхатов Н.С., Чуркина К.М., Тураев А.С. Влияние расположения сульфатных групп в сульфатах целлюлозы на стабильность их макромолекулы // Химия растит. сырья. 2014. № 2. С. 61–66.

Normakhamatov N.S., Churkina K.M., Turaev A.S. Influence of the Location of Sulphate Groups in Cellulose Sulphates on Stability of Their Macromolecule. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2014, no. 2, pp. 61–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1402061>

10. Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Миронов П.В. Гидродинамически активированная древесина сосны: термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы 6-го Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию региональн. координацион. совета по соврем. проблемам древесиноведения. Новосибирск: СО РАН, 2018. С. 161–165.

Petrulina Y.A., Loskutov S.R., Mironov P.V. Hydrodynamically Activated Wood of Pine: Thermogravimetry, Differential Scanning Calorimetry. *Structure, Properties and Quality of Wood – 2018*: Proceedings of the 6-th International Symposium named after B.N. Ugolev, Dedicated to the 50th Anniversary of the Regional Coordination Council on Modern Problems of Wood Science. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, pp. 161–165. (In Russ.).

11. Сабирова Г.А., Сафин Р.Р., Хайруллин Р.З., Галяветдинов Н.Р., Кайнов П.А. Влияние концентрации наполнителя на физико-механические свойства древесно-наполненных материалов // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 3(15). С. 24–34.

Sabirova G.A., Safin R.R., Khairullin R.Z., Galiavetdinov N.R., Kainov P.A. Influence of Filler Concentration on Physical and Mechanical Properties of Wood-Filled Materials. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies, 2020, no. 3(15), pp. 24–34. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.24>

12. Сутягин В.М., Ляпков А.А. Физико-химические методы исследования полимеров. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2008. 130 с.

Sutyagin V.M., Lyapkov A.A. *Physico-Chemical Methods for Studying Polymers*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2008. 130 p. (In Russ.).

13. Урьяш В.Ф., Кокурина Н.Ю. Влияние источника получения и степени упорядоченности на физико-химические свойства целлюлозы и ее нитратов // Вестн. Нижегородски. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. Т. 1, № 6. С. 111–116.

Uryash V.F., Kokurina N.Yu. The Effect of Source and Degree of Ordering on Physico-Chemical Properties of Cellulose and its Nitrates. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 111–116. (In Russ.).

14. Усова К.А., Захаров П.С., Шкуро А.Е., Глухих В.В. Влияние степени ацетилирования целлюлозы на свойства ненаполненного ацетата целлюлозы // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2023. С. 548–552.

Usova K.A., Zaharov P.S., Shkuro A.Ye., Gluhikh V.V. Influence of the Degree of Cellulose Acetylation on the Properties of Unfilled Cellulose Acetate. *An 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: Materials of the XIV International Scientific and Technical Conference*. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2023, pp. 548–552. (In Russ.).

15. Шкуро А.Е., Глухих В.В., Усова К.А., Чирков Д.Д., Захаров П.С., Вураско А.В. Получение биокomпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы с различной степенью ацетилирования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 155–168.

Shkuro A.E., Glukhikh V.V., Usova K.A., Chirkov D.D., Zakharov P.S., Vurasko A.V. Deriving Biocomposites of Polymer Phase Plasticised Cellulose Acetates with Varying Degrees of Acetylation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 155–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-155-168>

16. Accorsi R., Cascini A., Cholette S., Manzini R., Mora C. Economic and Environmental Assessment of Reusable Plastic Containers: A Food Catering Supply Chain Case Study. *International Journal of Production Economics*, 2014, vol. 152, pp. 88–101.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.014>

17. Baghaei B., Skrifvars M. All-Cellulose Composites: A Review of Recent Studies on Structure, Properties and Applications. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 12, art. no. 2836.

<https://doi.org/10.3390/molecules25122836>

18. Delviawan A., Kojima Y., Kobori H. The Influence of Wet Milling Time of Wood Flour on the Water Resistance of Wood Plastic Composite. *Proceedings of UGSAS-GU & BWEL Joint Poster Session on Agricultural and Basin Water Environmental Sciences*, 2020, vol. 9.

19. Delviawan A., Kojima Y., Kobori H., Suzuki S., Aoki K., Ogoe S. The Effect of Wood Particle Size Distribution on the Mechanical Properties of Wood–Plastic Composite. *Journal of Wood Science*, 2019, vol. 65, art. no. 67.

<https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>

20. Edgar K.J., Buchanan C.M., Debenham J.S., Rundquist P.A., Seiler B.D., Shelton M.C., Tindall D. Advances in Cellulose Ester Performance and Application. *Progress in Polymer Science*, 2001, vol. 26, no. 9, pp. 1605–1688.

[https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(01\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(01)00027-2)

21. Farrokhpayam S.R., Shahabi M.A., Sheshkal B.N., Gargari R.M. The Morphology, Physical, and Mechanical Properties of Poly (Lactic Acid)-Based Wood Flour and Pulp Fiber Biocomposites. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2021, vol. 18, pp. 20–25.

<https://doi.org/10.1007/s13196-021-00274-4>

22. Ganster J., Fink H.-P. Cellulose and Cellulose Acetate. *Bio-Based Plastics: Materials and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013, chapt. 3, pp. 35–62.

<https://doi.org/10.1002/9781118676646.ch3>

23. Gogoi R., Manik G. Mechanical Properties of Wood Polymer Composites. *Wood Polymer Composites. Composites Science and Technology*. Singapore, Springer, 2021, pp. 113–136. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8_6)

24. Gravelsins R.J. *Studies of Grinding of Wood and Bark-Wood Mixtures with the Szego Mill*: Doc. of Philosophy Thesis. University of Toronto, 1998. 352 p.

25. Heinze T., El Seoud O.A., Koschella A. *Cellulose Derivatives: Synthesis, Structure, and Properties*. Springer, 2018. 531 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73168-1>

26. Isa A., Minamino J., Kojima Y., Suzuki S., Ito H., Makise R., Okamoto M., Endo T. The Influence of Dry-Milled Wood Flour on the Physical Properties of Wood Flour/Polypropylene Composites. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 2, pp. 105–113. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1083583>

27. Khan M.Z.R., Srivastava S.K., Gupta M.K. A State-of-the-Art Review on Particulate Wood Polymer Composites: Processing, Properties and Applications. *Polymer Testing*, 2020, vol. 89, art. no. 106721. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721>

28. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular Economy: the Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 2018, vol. 143, pp. 37–46.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

29. Lima D.C., de Melo R.R., Pimenta A.S., Pedrosa T.D., de Souza M.J.C., de Souza E.C. Physical–Mechanical Properties of Wood Panel Composites Produced with *Qualea sp.* Sawdust and Recycled Polypropylene. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 4858–4865. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06953-7>

30. Liu D., Song J., Anderson D.P., Chang P.R., Hua Y. Bamboo Fiber and its Reinforced Composites: Structure and Properties. *Cellulose*, 2012, vol. 19, pp. 1449–1480.

<https://doi.org/10.1007/s10570-012-9741-1>

31. Liu Y., Feldner A., Kupfer R., Zahel M., Gude M., Arndt T. Cellulose-Based Composites Prepared by Two-Step Extrusion from Miscanthus Grass and Cellulose Esters. *Fibers and Polymers*, 2022, vol. 23, pp. 3282–3296. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-0399-5>

32. Mohammed M.M., Rasidi M., Mohammed A.M., Rahman R.B., Osman A.F., Adam T., Betar B.O., Dahham O.S. Interfacial Bonding Mechanisms of Natural Fibre-Matrix Composites: An Overview. *BioResources*, 2022, vol. 17, iss. 4, pp. 7031–7090.

<https://doi.org/10.15376/biores.17.4.Mohammed>

33. Murayama K., Yamamoto M., Kobori H., Kojima Y., Suzuki S., Aoki K., Ito H., Ogoe S., Okamoto M. Mechanical and Physical Properties of Wood–Plastic Composites Containing Cellulose Nanofibers Added to Wood Flour. *Forest Products Journal*, 2018, vol. 68, iss. 4, pp. 398–404. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-18-00006>

34. Nagarajan K.J., Balaji A.N., Basha K.S., Ramanujam N.R., Kumar R.A. Effect of Agro Waste  $\alpha$ -Cellulosic Micro Filler on Mechanical and Thermal Behavior of Epoxy Com-

posites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 152, pp. 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.255>

35. Naghdi R. Advanced Natural Fibre-Based Fully Biodegradable and Renewable Composites and Nanocomposites: A Comprehensive Review. *International Wood Products Journal*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 178–193. <https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1945180>

36. Özdemir F., Ayırlıms N., Yurttaş E. Mechanical and Thermal Properties of Biocomposite Films Produced from Hazelnut Husk and Polylactic Acid. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, vol. 27, iss. 6, pp. 783–789. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1955972>

37. Panaitescu D.M., Nicolae C.A., Gabor A.R., Trusca R. Thermal and Mechanical Properties of Poly(3-Hydroxybutyrate) Reinforced with Cellulose Fibers from Wood Waste. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 145, art. no. 112071. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112071>

38. Pelaez-Samaniego M.R., Yadama V., Lowell E., Espinoza-Herrera R. A Review of Wood Thermal Pretreatments to Improve Wood Composite Properties. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, pp. 1285–1319. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0574-3>

39. Pokryshkin S., Sypalova Y., Ivahnov A., Kozhevnikov A. Optimization of Approaches to Analysis of Lignin by Thermal Decomposition. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 13, art. no. 2861. <https://doi.org/10.3390/polym15132861>

40. Qiang T., Wang J., Wolcott M.P. Facile Preparation of Cellulose/Poly lactide Composite Materials with Tunable Mechanical Properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, vol. 57, iss. 13, pp. 1288–1295. <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1381243>

41. Roman M., Winter W.T. Effect of Sulfate Groups from Sulfuric Acid Hydrolysis on the Thermal Degradation Behavior of Bacterial Cellulose. *Biomacromolecules*, 2004, vol. 5, iss. 5, pp. 1671–1677. <https://doi.org/10.1021/bm034519>

42. Salasinska K., Ryszkowska J. The Effect of Filler Chemical Constitution and Morphological Properties on the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites. *Composite Interfaces*, 2015, vol. 22, iss. 1, pp. 39–50. <https://doi.org/10.1080/15685543.2015.984521>

43. Shah B.L., Selke S.E., Walters M.B., Heiden P.A. Effects of Wood Flour and Chitosan on Mechanical, Chemical, and Thermal Properties of Polylactide. *Polymer Composites*, 2008, vol. 29, iss. 6, pp. 655–663. <https://doi.org/10.1002/pc.20415>

44. Sharma A., Mandal T., Goswami S. Fabrication of Cellulose Acetate Nanocomposite Films with Lignocellulosic Nanofiber Filler for Superior Effect on Thermal, Mechanical and Optical Properties. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 2021, vol. 25, art. no. 100642. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100642>

45. Shen D.K., Gu S. The Mechanism for Thermal Decomposition of Cellulose and its Main Products. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, iss. 24, pp. 6496–6504. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.095>

46. Španić N., Jambrekić V., Šernek M., Medved S. Influence of Natural Fillers on Thermal and Mechanical Properties and Surface Morphology of Cellulose Acetate-Based Biocomposites. *International Journal of Polymer Science*, 2019, vol. 2019, iss. 1, art. no. 1065024. <https://doi.org/10.1155/2019/1065024>

47. Werner K., Pommer L., Broström M. Thermal Decomposition of Hemicelluloses. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, vol. 110, pp. 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.08.013>

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



Краткое сообщение

УДК 630\*181.2/.232.3:582.475

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-200-209

## Изменчивость показателей шишек и семян кедр корейского в условиях интродукции

*С.В. Попова*<sup>✉</sup>, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3539-1297>

*Р.Н. Матвеева*, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-9622>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; [zujrfl1@yandex.ru](mailto:zujrfl1@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [matveevrn@yandex.ru](mailto:matveevrn@yandex.ru)

Поступила в редакцию 08.09.24 / Одобрена после рецензирования 03.12.24 / Принята к печати 05.12.24

**Аннотация.** Кедр корейский (*Pinus koraiensis*) является ценным лесообразующим древесным видом, который выращивают не только в ареале, но и в условиях интродукции. Наше исследование направлено на сопоставление изменчивости показателей шишек и семенного потомства дерева КО-9, отобранного по урожайности на плантации «Известковая», расположенной на территории Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва (пригородная зона г. Красноярка). Семена кедр были заготовлены осенью 1965 г. в насаждении Приморского края (Тудо-Вакское лесничество; 46° 54' с. ш. 134° 12' в. д., 200 м над ур. м.; III класс бонитета, IV класс возраста). Схема посадки на плантации – 5×5 м. Дерево в возрасте 31 год образовало первые шишки. С 1999 по 2013 гг. их сформировалось 80 шт., при среднем значении в данном варианте – 23 шт. Превышение составило 247,8 %. В 2020 г. на обследованном дереве было 46 шишек. Наибольшее количество всходов появилось из 8 шишек, показатели которых взяты для сопоставления. Длина шишек с дерева № 24 составила 16 см, № 3 – 12 см. Диаметр шишек варьировал от 7,5 см (шишка № 21) до 9,7 см (№ 24). Между длиной и диаметром шишек установлена умеренная теснота связи ( $r = 0,488$ ). Средняя высота 1-летних сеянцев кедр корейского равнялась 3,8 см, при наибольшем показателе 4,4 см (потомство из шишки № 45). Уровень изменчивости по количеству и длине первичной хвои высокий. По количеству первичной хвои выделяется потомство из шишки № 44, длине – № 3; по количеству семядолей – также из шишки № 44 (13,3 шт.), по длине – № 24 (3,3 см). Значительная теснота связи установлена между длиной первичной хвои и семядолей, высотой 1-летних сеянцев и количеством семядолей, длиной шишек и высотой 1-летних сеянцев. В 2-летнем возрасте наибольшая высота и длина хвои были у потомства из шишки – № 44. Установлена значительная теснота связи для высоты 2-летних сеянцев и длины хвои. Двухлетние сеянцы, наибольшее количество которых получено из крупных шишек, были отобраны по высоте.

**Ключевые слова:** кедр корейский, шишки, сеянцы, изменчивость, рост, интродукция

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках госзадания № FEFE-2024-0013 по заказу Министерства науки и высшего образования РФ коллективом научной лаборатории «Селекция древесных растений» по теме «Селекционно-генетические основы фор-

мирования целевых насаждений и рационального использования древесных ресурсов Красноярского края (Енисейской Сибири)».

*Для цитирования:* Попова С.В., Матвеева Р.Н. Изменчивость показателей шишек и сеянцев кедр корейского в условиях интродукции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 200–209. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-200-209>

Brief report

## Variability of Korean Pine Cone and Seedling Parameters under the Conditions of Introduction

*Svetlana V. Popova*<sup>✉</sup>, *Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3539-1297>*  
*Rimma N. Matveeva*, *Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-9622>*  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; [zujlrf11@yandex.ru](mailto:zujlrf11@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [matveevrn@yandex.ru](mailto:matveevrn@yandex.ru)

*Received on September 8, 2024 / Approved after reviewing on December 3, 2024 / Accepted on December 5, 2024*

**Abstract.** Korean pine (*Pinus koraiensis*) is a valuable forest-forming tree species that is grown not only in its natural habitat, but also in the conditions of introduction. Our study has been aimed at comparing the variability of cone and seed progeny parameters of the KO-9 tree, selected for its yield on the “Izvestkovaya” Plantation, located on the territory of the Karaul’noe Forestry of the Educational and Experimental Forestry Enterprise of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (suburban area of the city of Krasnoyarsk). Korean pine seeds were harvested in the autumn of 1965 in a plantation in the Primorsky Territory (the Tудо-Vakskoe Forestry; 46° 54' N, 134° 12' E, 200 m above sea level; III quality class, IV age class). Planting pattern on a 5×5 m plantation. The tree formed its first cones at the age of 31. From 1999 to 2013, 80 cones were formed, with an average value of 23 pcs. in this variant. The excess has been 247.8 %. In 2020, there were 46 cones on the examined tree. The largest number of shoots has appeared from 8 cones, the parameters of which have been taken for comparison. The cones from tree no. 24 have been 16 cm long, from no. 3 – 12 cm long. The diameter of cones has varied from 7.5 cm (cone no. 21) to 9.7 cm (no. 24). A moderate correlation has been found between the length and diameter of cones ( $r = 0.488$ ). The average height of 1-year-old Korean pine seedlings has been 3.8 cm, with the highest value being 4.4 cm (the progeny from cone no. 45). The level of variability in the number and length of primary needles has been high. In terms of the number of primary needles, the offspring from cone no. 44 is distinguished, in terms of the length – from no. 3; in terms of the number of cotyledons – also from cone no. 44 (13.3 pcs.), in terms of the length – from no. 24 (3.3 cm). A significant correlation has been established between the length of primary needles and cotyledons, as well as between the length of cones and the height of 1-year-old seedlings. At the age of 2, the greatest height and length of the needles have been in the progeny from cone no. 44. A significant correlation has been established between the height of 2-year-old seedlings and the length of the needles. Two-year-old seedlings, the largest number of which has been obtained from large cones, have been selected by height.

**Keywords:** Korean pine, cones, seedlings, variability, growth, introduction

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the state assignment no. FEFE-2024-0013 commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation by the staff of the scientific laboratory “Breeding of Woody Plants”

on the topic “Breeding and Genetic Foundations for the Formation of Target Plantations and the Rational Use of Wood Resources of the Krasnoyarsk Territory (Yenisei Siberia)”.

**For citation:** Popova S.V., Matveeva R.N. Variability of Korean Pine Cone and Seedling Parameters under the Conditions of Introduction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 200–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-200-209>

### *Введение*

Ареал кедр корейского в России находится на Дальнем Востоке, к югу от р. Буреи и среднего течения р. Амур. Это один из основных лесообразующих видов хвойно-широколиственных лесов. Кедр корейский произрастает в условиях муссонного климата. В связи с тем, что вид отличается хозяйственной ценностью, он представляет интерес для выращивания и в условиях интродукции. Разведением кедр корейского в условиях Подмосковья занимаются в Ивантеевском питомнике, в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина (ГБС РАН) и др. [4–7].

Показатели роста и семеношения кедр корейского являются важнейшими при адаптации к новым условиям. Опыты по выращиванию этого вида свидетельствуют, что кедр корейский и за пределами ареала можно использовать как орехоплодное и декоративное дерево [1, 8, 9, 12, 15, 20, 21].

Н.П. Братиловой и др. [2, 3] установлено, что кедр корейский отличается хорошим ростом, но обладает наименьшими адаптивными способностями к пониженным температурам в условиях пригородной зоны г. Красноярска по сравнению с местным видом – кедром сибирским. С.В. Левиным [13] отмечено, что кедр корейский имеет лучший рост и развитие при совместном произрастании с кедром сибирским на территории Воронежской области.

Г.В. Кузнецовой [11] выявлено, что в Ермаковском лесничестве Красноярского края кедр корейский почти не уступает по приросту кедр сибирскому.

Есть публикации по определению изменчивости шишек кедр корейского. Так, Р. Кобаяси, Н.В. Выводцев [10], проводя исследования кедр корейского в насаждениях Хабаровского края, установили, что варьирование длины шишек находится на низком и среднем уровнях, диаметра – на низком.

А.М. Пастуховой, Р.Н. Матвеевой [18] было показано, что у деревьев данного вида в 47-летнем возрасте, произрастающих на лесосеменной плантации при их размещении 5×5 м, длина шишки варьирует от 10,1 до 13,6 см, диаметр – от 6,1 до 7,9 см.

Н.Ф. Овчинниковой, А.Н. Гридновой [17] отмечена высокая внутривидовая изменчивость 7-летних и 8-летних сеянцев кедр корейского по высоте и диаметру в зависимости от географического происхождения семян. По высоте уровень изменчивости составлял 15 и 17 %, диаметру у основания ствола – 25 и 29 %, приросту побега – 28–36 %.

Целью исследования стало установление изменчивости показателей сеянцев кедр корейского в зависимости от размеров шишек с дерева КО-9 и проведение отбора быстрорастущих экземпляров в 2-летнем возрасте.

### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследования были шишки, 1-летние и 2-летние сеянцы от урожайного кедр корейского КО-9, который отличался ранним репродуктив-

ным развитием и наибольшим количеством шишек в первые годы семеношения. Он произрастает на территории Караульного лесничества Учебно-опытного лесхоза Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва (пригородная зона г. Красноярка). Семена сосны кедровой корейской были заготовлены осенью 1965 г. в насаждении Приморского края (Тудо-Вакское лесничество;  $46^{\circ} 54'$  с. ш.  $134^{\circ} 12'$  в. д., 200 м над ур. м.; III класс бонитета, IV класс возраста). Схема посадки на плантации –  $5 \times 5$  м. В возрасте 31 год у дерева появились первые шишки. С 1999 по 2013 гг. их сформировалось 80 шт., при среднем значении в данном варианте 23 шт. превышение составило 247,8 % [16].

В 2020 г. с данного дерева были заготовлены 46 шишек. Наибольшее количество всходов было из 8 шишек, показатели которых взяты для сопоставления.

У шишек измеряли длину и диаметр. Определяли высоту, количество и длину первичной хвои, семядолей у 1-летних сеянцев, а также прирост, пучковую хвою, количество и длину верхушечных почек, диаметр стволика у 2-летних сеянцев. Изменчивость показателей оценивали по шкале С.А. Мамаева [14]. Тесноту корреляционных связей устанавливали по таблице Э.Н. Фалалеева, А.С. Смольянова [19]. Данные обработаны статистически с использованием программы Microsoft Excel.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Показатели шишек с дерева КО-9, из семян которых были выращены сеянцы, приведены в табл. 1. Шишки № 24, 26 и 31 имели превышение по длине на 13,8; 10,2 и 6,7 % соответственно и шишки № 24 и 45 – по диаметру – на 9,0 и 6,7 % соответственно. Между длиной и диаметром шишек установлена умеренная теснота связи  $r = 0,488$ .

Таблица 1

**Показатели шишек кедр корейского**  
**The parameters of Korean pine cones**

Номер шишки	Длина шишки		Диаметр шишки	
	см	% к $X_{cp}$	см	% к $X_{cp}$
3	12,0	85,3	8,5	95,5
21	12,5	88,9	7,5	84,3
22	14,5	103,1	9,0	101,1
24	15,5	110,2	9,7	109,0
26	15,0	106,7	9,0	101,1
31	16,0	113,8	9,0	101,1
44	13,0	92,4	9,0	101,1
45	14,0	99,6	9,5	106,7
<i>Среднее</i>	14,1	100,0	8,9	100,0

Посев семян проведен 10.06.2021 г. Средняя высота 1-летних сеянцев кедр корейского составила 3,8 см. Большой высотой отличались сеянцы из семян шишек № 3, 21, 26 и 45 (табл. 2). Уровень изменчивости сеянцев по высоте варьировал от низкого до высокого. Сеянцы из шишек № 22, 24, 31, 44 имели меньшую высоту, что подтверждалось статистически ( $t_{ф} > t_{05}$ ).

Таблица 2

**Изменчивость высоты 1-летних сеянцев кедр корейского, см**  
**The variability of height of 1-year-old Korean pine seedlings, cm**

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости	
3	5,2	3,4	4,0	0,52	0,13	13,0	3,3	1,70	Средний	
21	5,5	2,5	4,0	0,86	0,22	21,6	5,6	1,35	Высокий	
22	5,3	2,0	3,7	0,95	0,25	25,7	6,6	2,24		
24	4,8	2,7	3,6	0,64	0,19	17,9	5,2	2,98	Средний	
26	4,9	2,0	3,9	0,84	0,22	21,4	5,5	1,73	Высокий	
31	4,0	2,5	3,3	0,45	0,12	13,6	3,8	4,78	Средний	
44	4,5	3,0	3,7	0,43	0,11	11,7	3,0	3,13	Низкий	
45	5,6	3,0	4,4	0,75	0,19	17,0	4,4	–	Средний	
<i>Среднее</i>			3,8							

Количество первичной хвои варьировало от 2 до 14 шт. при среднем значении 8,1 шт. (табл. 3). Ее наибольшее количество было у сеянцев из шишки № 44. Достоверность различий подтверждается для сеянцев из шишек № 3, 26 и 31. У потомства остальных шишек различие по количеству первичной хвои статистически не доказано. Отмечен высокий уровень изменчивости по данному показателю – 21,7–37,4 %.

Таблица 3

**Изменчивость количества первичной хвои у сеянцев кедр корейского, шт.**  
**The variability in the number of primary needles in Korean pine seedlings, pcs.**

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости	
3	11	4	7,3	2,02	0,52	27,6	7,1	2,72	Высокий	
21	13	5	8,3	2,31	0,60	27,8	7,2	1,26		
22	12	2	7,7	2,88	0,74	37,4	9,7	1,76		
24	13	6	8,8	2,15	0,62	24,4	7,0	0,62		
26	10	3	6,7	2,02	0,52	30,1	7,8	3,53		
31	12	4	7,1	2,40	0,66	33,7	9,4	2,61		
44	14	7	9,3	2,02	0,52	21,7	5,6	–		
45	13	6	9,2	2,02	0,52	21,9	5,7	0,14		
<i>Среднее</i>			8,1							

Максимальная длина первичной хвои составляла 1,8 см для сеянца из шишки № 44. Наибольшая средняя длина первичной хвои зафиксирована у сеянцев из шишки № 3. Все сеянцы из сравниваемых шишек имеют высокий уровень изменчивости по длине первичной хвои (табл. 4).

Таблица 4

**Изменчивость длины первичной хвои у сеянцев кедр корейского, см**  
**The variability of length of primary needles in Korean pine seedlings, cm**

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости
3	1,7	0,7	1,2	0,29	0,07	24,0	6,2	–	Высокий
21	1,6	0,5	1,0	0,32	0,08	31,7	8,2	1,81	
22	1,5	0,7	1,1	0,23	0,06	21,0	5,4	1,05	
24	1,6	0,6	1,1	0,31	0,09	27,9	8,1	0,86	

Окончание табл. 4

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости	
26	1,5	0,5	1,0	0,29	0,07	28,8	7,4	1,90	Высокий	
31	1,5	0,3	1,1	0,36	0,10	32,7	9,1	0,80		
44	1,8	0,7	1,1	0,32	0,08	28,8	7,4	0,90		
45	1,3	0,5	1,0	0,23	0,06	23,1	6,0	2,10		
<i>Среднее</i>			1,1							

Семядолей у сеянцев из шишки № 44 больше, чем у сеянцев из шишки № 45, что подтверждается статистически ( $t_{\phi} = 2,61$ ). В остальных случаях различия недостоверны (табл. 5).

Таблица 5

**Изменчивость количества семядолей у сеянцев кедра корейского, шт.**  
**The variability in the number of cotyledons in Korean pine seedlings, pcs.**

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости	
3	15	10	12,9	1,44	0,37	11,2	2,9	0,84	Низкий	
21	14	10	12,5	1,15	0,30	9,2	2,4	1,90		
22	14	11	12,7	0,86	0,22	6,8	1,8	1,61		
24	14	11	13,2	0,92	0,27	7,0	2,0	0,25		
26	14	12	13,0	0,58	0,15	4,4	1,1	0,90		
31	14	11	12,6	0,90	0,25	7,1	2,0	1,80		
44	15	11	13,3	1,15	0,30	8,7	2,2	–		
45	14	10	12,2	1,15	0,30	9,4	2,4	2,61		
<i>Среднее</i>			12,8							

Средняя длина семядолей составляла 3,2 см. Уровень изменчивости варьировал от низкого до высокого (табл. 6). У потомства сравниваемых шишек различия по длине семядолей статистически недостоверны ( $t_{\phi} < t_{05}$ ).

Таблица 6

**Изменчивость длины семядолей у сеянцев кедра корейского, см**  
**The variability of the cotyledon length in Korean pine seedlings, cm**

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости	
3	4,2	2,0	3,1	0,63	0,16	20,5	5,3	1,00	Высокий	
21	3,6	2,5	3,2	0,32	0,08	9,9	2,6	0,71	Низкий	
22	4,0	2,0	3,2	0,58	0,15	18,0	4,7	0,53	Средний	
24	3,8	2,5	3,3	0,40	0,12	12,1	3,5	–		
26	3,8	1,7	3,0	0,61	0,16	20,2	5,2	1,55	Высокий	
31	4,2	2,6	3,3	0,48	0,13	14,5	4,0	0,00	Средний	
44	3,5	2,6	3,1	0,26	0,07	8,4	2,2	1,50	Низкий	
45	3,5	2,8	3,2	0,20	0,05	6,3	1,6	0,79		
<i>Среднее</i>			3,2							

Сравнение высоты сеянцев, первичной хвои и семядолей показало, что сеянцы из шишки № 45 характеризовались наибольшими высотой (на 15,8 %) и количеством первичной хвои (на 13,5 %), № 44 – количеством первичной хвои (на 14,8 %), № 3 – ее длиной (на 9,1 %).

Установлена значительная теснота связи между длиной первичной хвои и длиной семядолей (0,628), высотой 1-летних сеянцев и количеством семядолей (0,615), длиной шишки и высотой 1-летних сеянцев (0,536).

Двухлетние сеянцы из семян шишек № 24 и 26 имели высоту на 14,9 и 7,5 % больше средней соответственно (табл. 7). Хвоя характеризовалась превышением по длине у сеянцев из шишек № 3 и 24. Наибольшее количество верхушечных почек было у сеянцев из шишки № 44. Установлено, что 2-летним сеянцам кедра корейского свойствен уровень изменчивости по высоте и длине хвои низкий и средний, количеству верхушечных почек – средний и высокий.

Установлена значительная теснота связи между высотой 2-летних сеянцев и длиной хвои ( $r = 0,537$ ).

Таблица 7

**Изменчивость показателей 2-летних сеянцев кедра корейского**  
**The variability of parameters of 2-year-old Korean pine seedlings**

Номер шишки	Max	Min	$X_{cp}$	$\pm\delta$	$\pm m$	V, %	P, %	$t_{\phi}$ при $t_{05} = 2,04$	Уровень изменчивости
<i>Высота сеянца, см</i>									
3	7,6	6,7	7,1	0,26	0,07	3,7	0,9	3,04	Низкий
21	7,5	6,4	6,9	0,32	0,08	4,6	1,2	3,94	
22	6,2	5,6	5,9	0,17	0,04	2,9	0,8	9,41	
24	8,4	6,3	7,7	0,64	0,19	8,4	2,4	–	
26	9,8	5,6	7,2	1,21	0,31	16,8	4,3	1,37	Средний
31	6,5	5,4	6,0	0,33	0,09	5,5	1,5	8,21	Низкий
44	7,6	6,2	6,9	0,40	0,10	5,8	1,5	3,75	
45	8,2	4,4	6,2	1,10	0,28	17,7	4,6	4,43	Средний
<i>Среднее</i>		6,7							
<i>Длина хвои, см</i>									
3	4,8	4,2	4,6	0,17	0,04	3,8	1,0	1,35	Низкий
21	4,5	3,8	4,2	0,20	0,05	4,8	1,2	3,97	
22	4,0	2,8	3,5	0,35	0,09	9,9	2,6	7,76	
24	5,5	3,9	4,8	0,49	0,14	10,2	3,0	–	Средний
26	4,5	3,5	4,0	0,29	0,07	7,2	1,9	5,00	Низкий
31	4,5	3,5	3,9	0,30	0,08	7,7	2,1	5,48	
44	4,2	3,3	3,5	0,26	0,07	7,4	1,9	8,30	
45	5,0	3,2	4,0	0,52	0,13	13,0	3,3	4,10	
<i>Среднее</i>		4,1							
<i>Количество верхушечных почек, шт.</i>									
3	3	1	1,7	0,58	0,15	33,9	8,8	1,90	Высокий
21	3	1	1,9	0,58	0,15	30,3	7,8	0,95	
22	2	1	1,6	0,29	0,07	18,0	4,7	3,01	Средний
24	3	1	1,8	0,61	0,18	34,1	9,8	1,30	Высокий
26	2	1	1,6	0,29	0,07	18,0	4,7	3,01	Средний
31	2	1	1,3	0,30	0,08	23,0	6,4	4,69	Высокий
44	3	1	2,1	0,58	0,15	27,4	7,1	–	
45	2	1	1,1	0,29	0,07	26,2	6,8	6,01	
<i>Среднее</i>		1,6							

Среди 2-летних сеянцев разных семей были отобраны отдельные экземпляры с наибольшей высотой (табл. 8). Их превышение по данному показателю над средним значением составило 14,9–46,3 %. Наибольшее количество быстрорастущих сеянцев отмечено у потомства из шишки № 24, имеющей превосходство по длине на 10,2 %, диаметру на – 9,0 % в сравнении со средним показателем по опыту.

Таблица 8

**Отобранные по высоте сеянцы кедр сибирского**  
**The Siberian stone pine seedlings selected by height**

Номер шишки	Номер сеянца	Высота		Номер шишки	Номер сеянца	Высота	
		см	%			см	%
24	1	8,4	125,4	26	3	8,4	125,4
	4	8,0	119,4		4	8,1	120,9
	5	8,2	122,4		6	8,0	119,4
	6	7,9	117,9		8	7,8	116,4
	7	7,7	114,9		9	9,8	146,3
	9	7,9	117,9	45	1	7,7	114,9
	10	8,1	120,9		3	8,2	122,4
		11	8,0	119,4	<i>Среднее</i>		6,7

*Заключение*

Установлена изменчивость шишек, 1-летних и 2-летних сеянцев кедр корейского от дерева КО-9. Сеянцы, выросшие из семян разных шишек одного дерева, отличаются по росту. Корреляционный анализ подтвердил наличие значительных связей между некоторыми показателями шишек, 1-летних и 2-летних сеянцев. Двухлетние сеянцы отобраны по интенсивности роста. Наибольшее количество быстрорастущих сеянцев было у потомства из шишки с превосходящими длиной и диаметром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Братилова Н.П. Адаптационная способность кедр корейского на юге Средней Сибири // Лесн. хоз-во. 2004. № 5. С. 28–29.  
Bratilova N.P. Adaptive Capacity of the Korean Pine in the South of Central Siberia. *Lesnoe khozyajstvo*, 2004, no. 5, pp. 28–29. (In Russ.).
2. Братилова Н.П., Калинин А.В. Биологическая продуктивность кедр корейского на юге Средней Сибири // Интродукция растений: теоретические, методические и прикладные проблемы: материалы Междунар. конф., посвящ. 70-летию Ботанического сада-института МарГТУ и 70-летию проф. М.М. Котова. Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т, 2009. С. 264–265.  
Bratilova N.P., Kalinin A.V. Biological Productivity of the Korean Pine in the South of Central Siberia. *Plant Introduction: Theoretical, Methodological and Applied Problems: Proceedings of the International Conference Dedicated to the 70th Anniversary of the Botanical Garden-Institute of Mari State Technical University and the 70th Anniversary of Prof. M.M. Kotov*. Yoshkr-Ola, Mari State Technical University Publ., 2009, pp. 264–265. (In Russ.).
3. Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Пастухова А.М., Шимова Ю.С., Гришолова М.В., Борчакова М.С., Коновалова Д.А. Интродукция сосны кедровой корейской на юге Средней Сибири // Хвойные бореал. зоны. 2019. Т. XXXVII, № 3–4. С. 209–213.

Bratilova N.P., Matveeva R.N., Pastukhova A.M., Shimova Yu.S., Grishlova M.V., Borchakova M.S., Konovalova D.A. Introduction of *Pinus Koraiensis* in the South of Middle Siberia. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2019, vol. XXXVII, no. 3–4, pp. 209–213. (In Russ.).

4. Дроздов И.И., Войтыук М.М. Выращивание посадочного материала кедр корейского // Лесн. хоз-во. 1989. № 4. С. 34–35.

Drozdov I.I., Vojtyuk M.M. Cultivating Korean Pine Planting Material. *Lesnoe khozyajstvo*, 1989, no. 4, pp. 34–35. (In Russ.).

5. Дроздов И.И., Дроздов Ю.И. Лесная интродукция. М.: МГУЛ, 2000. 135 с.

Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Forest Introduction*. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2000. 135 p. (In Russ.).

6. Дроздов И.И., Коженкова А.А. Выращивание кедр корейского в зоне смешанных лесов // Лесная геоботаника и биология древесных растений. Брянск, 1986. С. 39–48.

Drozdov I.I., Kozhenkova A.A. Cultivation of the Korean Pine in Mixed Forests. *Forest Geobotany and Biology of Woody Plants*. Bryansk, 1986, pp. 39–48. (In Russ.).

7. Дроздов И.И., Коженкова А.А., Белинский М.Н. Репродукция сосны кедровой корейской в Подмоскowie // Лесн. вестн. 2013. Т. 3. С. 4–7.

Drozdov I.I., Kozhenkova A.A., Belinsky M.N. Reproduction of the Korean Pine in the Moscow Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, vol. 3, pp. 4–7. (In Russ.).

8. Ирошников А.И., Твеленев М.В. Изучение генофонда, интродукции и селекции кедровых сосен // Лесоведение. 2001. № 4. С. 62–68.

Iroshnikov A.I., Tvelenev M.V. Study of the Gene Pool, Introduction and Breeding of Cedar Pines. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2001, no. 4, pp. 62–68. (In Russ.).

9. Карпун Ю.Н. Основы интродукции растений // Hortus botanicus. 2004. Т. 2. С. 17–32.

Karpun Yu.N. The Main Problems of Introduction. *Hortus botanicus*, 2004, vol. 2, pp. 17–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j4.art.2003.1682>

10. Кобаяси Р., Выводцев Н.В. Сравнительный анализ показателей шишек и семян кедр корейского в насаждениях Хабаровского края // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. СибГУ им. М.Ф. Решетнёва. Красноярск, 2017. С. 64–67.

Kobayashi R., Vyvodtsev N.V. Comparative Analysis of the Indicators of Cones and Seeds of Korean Pine in the Plantations of the Khabarovsk Territory. *Fruit Growing, Seed Production, Introduction of Woody Plants*. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Publ., 2017, pp. 64–67. (In Russ.).

11. Кузнецова Г.В. Рост, состояние и развитие кедровых сосен в географических культурах на юге Красноярского края // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. XXVII, № 1–2. С. 102–107.

Kuznetsova G.V. Growth, Condition and Development of Cedar Pines in Geographical Cultures in the South of the Krasnoyarsk Territory. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. XXVII, no. 1–2, pp. 102–107. (In Russ.).

12. Кузнецова Г.В., Грек В.С. Изучение адаптационного потенциала у кедровых сосен в разных пунктах тестирования // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, 2018. С. 108–112.

Kuznetsova G.V., Grek V.S. Study of the Adaptive Potential of Siberian Pine Trees at Different Testing Points. *Fruit Growing, Seed Production, Introduction of Woody Plants*. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Publ., 2018, pp. 108–112. (In Russ.).

13. Левин С.В. Адаптация кедр корейского при интродукции в условиях лесостепной зоны ЦЧР // Наука – лесному хозяйству Севера: сб. науч. тр. ФБУ «СевНИИЛХ», 2019. С. 211–221.

Levin S.V. Adaptation of Korean Pine during Introduction in the Forest-Steppe Zone of the Central Black Earth Region. *Nauka – lesnomy khozyajstvu Severa: Collection of Scientific Papers of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry”*, 2019, pp. 211–221. (In Russ.).

14. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.

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

15. Матвеева Р.Н., Братилова Н.П., Буторова О.Ф. Изменчивость показателей роста и генеративного развития кедровых сосен на плантации зеленой зоны города Красноярск // Сиб. лесн. журн. 2014. № 2. С. 81–86.

Matveeva R.N., Bratilova N.P., Butorova O.F. Variability of Growth Indicators and Generative Development of the Siberian and Korean Stone Pines at the Plantation in the “Green Zone” of Krasnoyarsk City. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 2, pp. 81–86. (In Russ.).

16. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф., Пастухова Р.Н. Рост и семеношение кедровых сосен на плантации «Известковая» в зеленой зоне г. Красноярск. Красноярск: СибГТУ, 2014. 168 с.

Matveeva R.N., Butorova O.F., Pastukhova R.N. *Growth and Seed Production of Cedar Pines on the “Izvestkovaya” Plantation in the Green Zone of Krasnoyarsk*. Krasnoyarsk, Siberian State Technological University Publ., 2014. 168 p. (In Russ.).

17. Овчинникова Н.Ф., Гриднев А.Н. Географические культуры *Pinus koraensis siebold* et Zucc. в Уссурийском лесничестве КГКУ «Примлес» // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2018. С. 108–112.

Ovchinnikova N.F., Gridnev A.N. Geographical Cultures of *Pinus koraiensis siebold* et Zucc. in the Ussuri Forestry RSI “Primles”. *Fruit Growing, Seed Production, Introduction of Woody Plants*. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Publ., 2018, pp. 108–112. (In Russ.).

18. Пастухова А.М., Матвеева Р.Н. Репродуктивное развитие кедр корейского в условиях интродукции (зеленая зона г. Красноярск) // Науч. ведомости Белгородск. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2011. № 3(98). Вып. 14/1. С. 51–55.

Pastukhova A.M., Matveeva R.N. Reproductive Development *Pinus Koraiensis* in Conditions the Introduction (the Green Zone of Krasnoyarsk). *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo universiteta: Estestvennye nauki = Belgorod State University Scientific Bulletin: Natural Sciences*, 2011, no. 3(98), iss. 14/1, pp. 51–55. (In Russ.).

19. Фалалеев Э.Н., Смольянов А.С. Математическая статистика. Красноярск: КГПУ, 1981. 128 с.

Falaleev E.N., Smol’yanov A.S. *Mathematical Statistics*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Pedagogical University Publ., 1981. 128 p. (In Russ.).

20. Critchfield W.B., Little E.L. Jr. *Geographic Distribution of the Pines in the World: Miscellaneous Publication 991*. Washington D.C., U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1966. 97 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.66393>

21. Owari T., Tatsumi S., Ning L., Yin M. Height Growth of Korean Pine Seedlings Planted under Strip-Cut Larch Plantations in Northeast China. *International Journal of Forestry Research*, 2015, vol. 15, iss. 1, art. no. 178681. <https://dx.doi.org/10.1155/2015/178681>

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

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

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

**Authors’ Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article

Краткое сообщение

УДК 630\*57

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-210-218

## Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем

*С.В. Коптев*<sup>1,2</sup>, *д-р с.-х. наук, доц., гл. науч. сотр.*; *ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>*

*Хасан Алабдуллахалхасно*<sup>1</sup>, *аспирант*; *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-550X>*

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru), 199213000hfa@gmail.com

<sup>2</sup>Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru)

---

*Поступила в редакцию 19.09.24 / Одобрена после рецензирования 12.12.24 / Принята к печати 13.12.24*

---

**Аннотация.** Приведены результаты изучения динамики таежно-тундровых лесных экосистем Архангельской области на основе материалов дистанционного зондирования Земли и применения классификации изображений с использованием алгоритма случайного леса (Random Forest). Изменение доли лесных, нелесных и не покрытых лесом площадей в районе исследования отмечено в лесном реестре. По итогам работы показано значительное увеличение территории лесов с 2016 по 2023 гг. – на 10,28 % за счет сокращения не покрытых лесом площадей и нелесных земель. Эта динамика обусловлена процессами успешного естественного восстановления лесов, а также их продвижением на север с захватом площадей в связи с изменением климата. Оценка точности автоматизированной классификации спутниковых изображений с использованием алгоритма случайного леса путем сравнения с эталонными данными с применением таких критериев, как общая точность и коэффициент Каппа (степень соответствия оценок модели фактическим данным), подтвердила надежность полученных результатов. В качестве эталонных показателей брали материалы таксационных выделительных баз данных, данных пробных площадей – стационарных и государственной инвентаризации лесов. Перед началом полевых работ были изучены картографические базы данных и подобраны пробные площади. С опорой на экспериментальные данные по исследуемому району создано большое количество полигонов, отражающих разнообразие лесных насаждений и нелесных территорий, для обучения алгоритма классификации спутниковых изображений. Обработка снимков, включая поправки, мозаику, геопроекцию и возврат, выполнялась с использованием SNAP (Sentinel Application Platform) – программы с открытым исходным кодом. Проанализированы 100 точек в различных лесорастительных условиях в районе исследования. Изучение динамики лесных экосистем на основе материалов дистанционного зондирования Земли и применение классификации изображений с использованием алгоритма случайного леса позволят повысить точность оценки ресурсного и экологического потенциалов насаждений северо-таежных и притундровых лесов Архангельской области.

**Ключевые слова:** динамика лесных экосистем, северо-таежные леса, притундровые леса, дистанционное зондирование, алгоритм случайного леса

**Благодарности:** Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований

в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы: 123022800118–4).

*Для цитирования:* Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Хасан. Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 210–218. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-210-218>

Brief report

## Applying the Random Forest Algorithm to Analyze the Dynamics of Taiga-Tundra Forest Ecosystems

*Sergey V. Koptev*<sup>1,2✉</sup>, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: ABD-5497-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>*  
*Hasan Alabdullahalhasno*<sup>1</sup>, *Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-550X>*

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru)<sup>✉</sup>, [199213000hfa@gmail.com](mailto:199213000hfa@gmail.com)

<sup>2</sup>Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru)<sup>✉</sup>

---

*Received on September 19, 2024 / Approved after reviewing on December 12, 2024 / Accepted on December 13, 2024*

---

**Abstract.** The article presents the results of studying the dynamics of taiga-tundra forest ecosystems in the Arkhangelsk Region based on the Earth remote sensing data and the application of image classification using the Random Forest algorithm. The change in the proportion of forested, non-forested and unforested areas in the study area is noted in the forest register. The results of the study show a significant increase in forest area between 2016 and 2023 (by 10.28 %) due to a reduction in non-forested areas and unstocked forest lands. This dynamics is due to the processes of successful natural restoration of non-forest covered areas, as well as their advancement northward taking-up lands due to climate change. The evaluation of the accuracy of automated classification of satellite images using the Random Forest algorithm by comparing them with reference data using criteria such as overall accuracy and the Kappa coefficient (the degree of correspondence between the model estimates and the actual data) has confirmed the reliability of the results obtained. The benchmarks have been taken from inventory databases, stationary sample plot data and the state forest inventory data. Before starting field work, cartographic databases have been studied and sample plots have been selected. Based on experimental data for the study area, a large number of polygons have been created, reflecting the diversity of forest stands and non-forest areas, to train the algorithm for classifying satellite images. Image processing, including corrections, mosaics, geoprojection and return, has been performed using SNAP (Sentinel Application Platform), an open source program. 100 points in various forest vegetation conditions in the study area have been analyzed. Studying the dynamics of forest ecosystems based on the Earth remote sensing data and the application of image classification using the Random Forest algorithm will improve the accuracy of assessing the resource and environmental potential of northern taiga and tundra forests of the Arkhangelsk Region.

**Keywords:** dynamics of forest ecosystems, northern taiga forests, tundra forests, remote sensing, Random Forest algorithm

**Acknowledgements:** The publication was prepared based on the results of the research carried out within the framework of the state assignment of the State Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for applied scientific research in the field of the Federal Forestry Agency activities (topic registration no. 123022800118–4).

**For citation:** Koptev S.V., Alabdullahalhasno H. Applying the Random Forest Algorithm to Analyze the Dynamics of Taiga-Tundra Forest Ecosystems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 210–218. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-210-218>

### Введение

Леса являются одним из наиболее важных возобновляемых природных ресурсов, источником производственного сырья, продуктов питания, а также способствуют биоразнообразию. Состояние лесов считают индикатором уровня развития экосистемы [5, 21]. Вырубка деревьев, климатические изменения – наиболее распространенные источники существенных трансформаций в лесном покрове, которые наблюдаются в настоящее время в мировом масштабе [8]. Основная причина сокращения биоразнообразия, сдвигов в глобальном углеродном цикле связана с изменениями в землепользовании [10, 27]. Климат северной тайги и притундровых лесов характеризуется экстремально холодной зимой, коротким и относительно прохладным летом. Северо-таежные и притундровые леса играют большую роль в регулировании глобального климата, защищая материковую часть от северных ветров, а также вносят значительный вклад в углеродный баланс. Эти леса вследствие малой экономической доступности и высоких защитных категорий также являются резервуаром биологического разнообразия, представляют собой уникальную и глобально ценную экосистему, неотъемлемую часть природной среды России [1]. Получение точной и постоянно обновляемой информации об изменениях площади лесного покрова важно для устойчивого управления лесными экосистемами [16, 20, 23]. Поэтому возникает необходимость регулярного мониторинга лесных территорий с анализом их изменений и создания комплексной и точной динамической базы данных о них.

Источником таких данных могут служить полевые лесоустроительные работы, стационарные исследования лесных экосистем, однако в этом случае изменения в лесах фиксируются периодически и на локальном уровне, подобные мероприятия также являются очень дорогостоящими и трудоемкими [6, 14].

Дистанционное зондирование – хороший инструмент мониторинга изменений в лесном покрове, поскольку позволяет быстро и эффективно оценивать динамику лесов, как на региональном, так и на глобальном уровнях, через определенные промежутки времени [12]. Это дает возможность учитывать изменения лесных экосистем при разработке адаптационных мер и плана лесохозяйственных мероприятий. Дистанционные методы радикально преобразовали концепцию сбора информации о лесных объектах, формулируя адекватное представление о пространственной динамике временных трансформаций в лесных экосистемах [11]. Методы дистанционного зондирования с использованием мультиспектральных спутниковых изображений нашли широкое применение, были признаны надежным способом оценки динамики растительного покрова, землепользования и ее отражения на картах благодаря высокой точности с позиций пространственного, спектрального и временного разрежений [4, 13, 19].

Для характеристики процессов в лесах с помощью методов дистанционного зондирования существует несколько подходов, которые включают в себя определение различий в разновременных изображениях, их регрессию, анализ направления изменений, сравнение показателей растительного покрова, вегетативных индексов растительности, сопоставление перечисленных данных после классификации, когда изображения, относящиеся к разным датам, относят либо к наблюдаемым, либо к неуправляемым, а затем сравнивают результаты для 2 снимков с установлением доли изменений компонентов [28]. Методы классификации космических изображений включают ненаправленную и направленную классификации, которые подразделяются на явления и категории через знание их местоположения или сведения об их спектральных отражениях [17].

Успех любой классификации спутниковых снимков, гарантирующий получение надежных результатов, зависит от различных факторов, основным из которых является выбор подходящей процедуры классификации [22]. Управляемые классификаторы широко используются, поскольку в данном случае они более мощные и точные [7]. Управляемая классификация включает в себя ряд алгоритмов, в т. ч. алгоритмы вычисления опорных векторов, нейронные сети и алгоритм случайного леса (Random Forest) [3].

Цель работы – оценить состояние и динамику северо-таежных и притундровых лесов сухопутной территории Арктики Архангельской области с использованием алгоритма случайного леса для спутниковых снимков.

#### *Объекты и методы исследования*

Район исследования расположен на территории Архангельской области на границе северо-таежных и притундровых лесов (рис. 1).

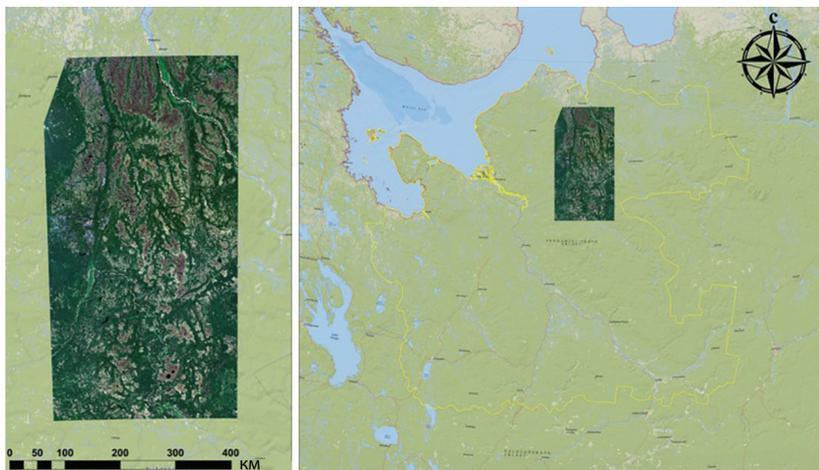


Рис. 1. Район исследования на территории Архангельской области

Fig. 1. The study area in the territory of the Arkhangelsk Region

Исследование проводилось с 2016 по 2023 гг. с использованием данных дистанционного зондирования Земли, материалов, полученных на пробных площадях, из таксационных повидельных баз данных и на пробных площадях государственной инвентаризации лесов.

Взяты данные со спутника Sentinel-2. Эти данные обеспечивают значительное улучшение спектрального покрытия, пространственно-

го разрешения и временной частоты по сравнению с данными спутника Landsat. Sentinel-2 представляет особый интерес для картирования растительности из-за наличия 2 новых полос в спектре красного спектра: 705 и 740 нм [13].

Для 2 периодов (2016 и 2023 гг.) были загружены по 2 сцены исследуемой территории, которые попадают в диапазон R064\_T38WMS и R064\_T38WMT. Рассмотрены изображения за летние месяцы, чтобы избежать влияния облачности и снизить частоту ошибок.

Обработка, включая поправки, мозаику, геопроекцию и возврат, выполнялась с использованием SNAP (Sentinel Application Platform) – программы с открытым исходным кодом, разработанной Европейским космическим агентством (ESA) для изучения спутниковых данных, в т. ч. данных Sentinel-2.

Спутниковые изображения были спроецированы в соответствии с проекционной системой UTM–zone–N38, модифицированной системой Меркатора и возвращены согласно мировой географической системе координат WGS–1984. Изображение переклассифицировано для всех спектральных диапазонов с использованием инструмента повторной выборки по спектру, т. к. алгоритм случайного леса в SNAP требует такой процедуры для достижения однородности характеристик и их готовности к обработке и анализу.

При изучении динамики лесных экосистем важно установить тенденцию перехода нелесных и не покрытых лесом площадей в лесные и покрытые лесом, а также обратную тенденцию, которые зависят от типа лесорастительных условий, полноты реализации лесохозяйственных мероприятий и их адаптации к климатическим изменениям.

Классификация спутниковых изображений является важнейшим элементом в области дистанционного зондирования и наблюдения за поверхностью Земли. Нами использована управляемая классификация, в частности – алгоритм случайного леса как эффективный инструмент быстрой и точной классификации данных [3, 15].

По сравнению с другими алгоритмами классификации: CART (Classification and Regression Trees – дерево решений), SVM (Support Vector Machine – метод опорных векторов), kNN (k-Nearest Neighbors – метод ближайших соседей) и MLC (Maximum Likelihood Classification – учет дисперсии и ковариации классов) – этот метод показал лучшие результаты по итогам многих исследований [25, 29] и представляет собой контролируемый непараметрический способ классификации с использованием машинного обучения. Его суть заключается в создании деревьев решений, где каждое дерево оценивает класс, к которому принадлежит отдельный пиксель спутникового изображения [15, 26]. Способность этого алгоритма обрабатывать большие наборы данных и объединять множество спектральных, пространственных и временных характеристик делает его хорошим инструментом для обнаружения даже незначительных изменений в лесных экосистемах [18, 24, 30]. Оценку точности классификации проводили с использованием коэффициента Каппа, отражающего степень соответствия классифицированных данных фактическим и находящегося в пределах от 0 до 1 [9].

В данной работе исследуемая территория была разделена на 2 категории: в 1-ю вошли покрытые лесом площади, во 2-ю – не покрытые и нелесные земли, в т. ч. водоемы, болота, постройки и сельскохозяйственные угодья.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью модуля Spatial Analyst в системе Arc GIS методом случайной генерации создано 100 точек оценки точности классификации (рис. 2).

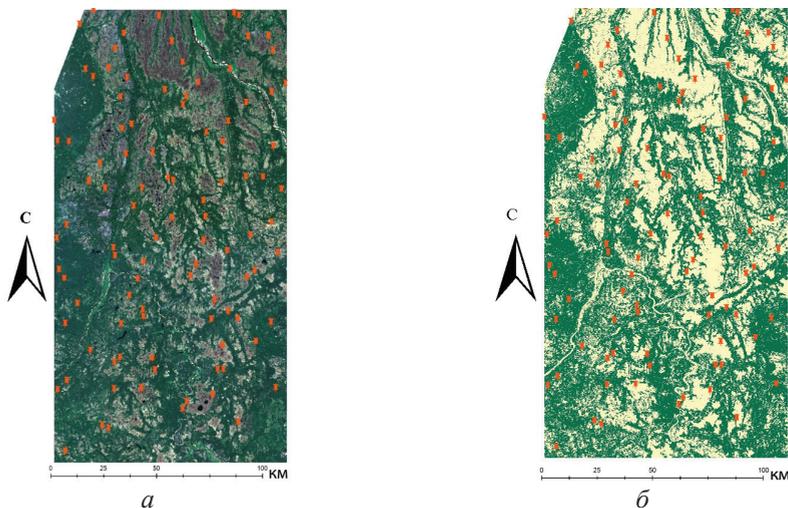


Рис. 2. Классификационные карты с контрольными точками:  
*a* – спутниковое изображение; *б* – классификационная карта

Fig. 2. The classification maps with control points: *a* – satellite image; *б* – classification map

На рис. 3 показана классификация изображений со спутника Sentinel-2 за исследованные годы с использованием алгоритма случайного леса. Результаты классификации и анализа динамики позволили выявить, что за 8 лет произошли изменения в соотношении лесных и нелесных площадей.

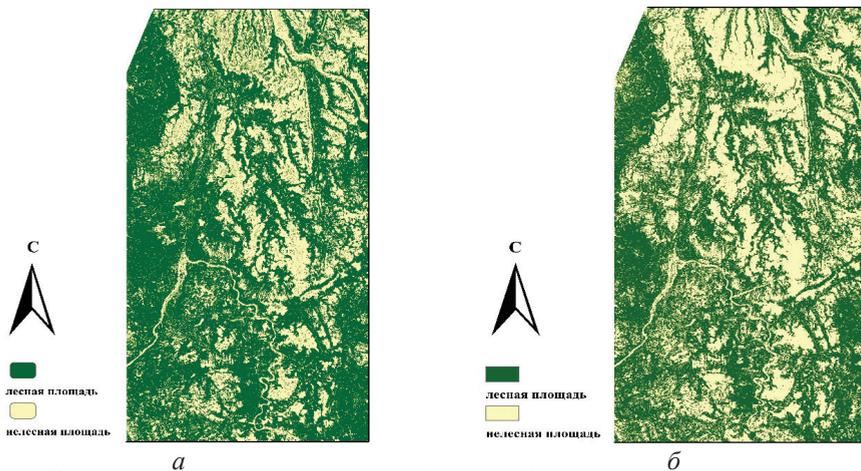


Рис. 3. Классификация спутниковых изображений с использованием алгоритма случайного леса: *a* – 2023 г.; *б* – 2016 г.

Fig. 3. The classification of satellite images using the Random Forest algorithm:  
*a* – 2023; *б* – 2016

В таблице отражено процентное соотношение каждой категории за период исследования. Покрытая лесом площадь в 2016 г. составила 54,27 % от изученной территории, а в 2023 г. достигла 64,55 %, нелесных или не покрытых лесом площадей в 2016 г. было 45,73 %, а в 2023 г. – 35,45 %.

**Изменение площадей классифицированных категорий, %, за период исследования**  
**The change in the areas of classified categories, %, over the study period**

Год	Площадь земель	
	покрытых лесом	не покрытых лесом / нелесных
2016	54,27	45,73
2023	64,55	35,45
Изменение	10,28	-10,28

Этот результат согласуется с данными государственного лесного реестра, согласно которому площадь лесов Архангельской области на 2021 г. по сравнению с началом 2007 г. увеличилась на 1375,5 тыс. га [2].

Рост лесных площадей объясняется проведением лесовосстановительных работ, направленных на поддержку естественного возобновления, и изменениями климата, которые в наибольшей степени проявляются в северных широтах.

Это подтверждает, что алгоритм случайного леса эффективен при анализе спутниковых снимков благодаря высокой точности классификации информации, способности обрабатывать сложные данные больших объемов, а также справляться с отсутствующими или искаженными показателями. Алгоритм также проявляет гибкость при работе с различными типами спектральных данных и позволяет интерпретировать результаты через вычисление важности переменных, что повышает точность определения изменений.

### *Заключение*

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в области классификации спутниковых изображений, в основном благодаря появлению и использованию в этой сфере передовых алгоритмов. Так, алгоритм случайного леса показал изменения лесных и нелесных площадей в районе северо-таежных и притундровых лесов.

Выявлено увеличение покрытой лесом площади в изучаемом районе с 2016 по 2023 г. при высокой точности классификации для всех используемых индикаторов. Это подтверждает возможность использования названного алгоритма в масштабных исследованиях динамики лесных экосистем.

Такие положительные изменения распространения лесов можно объяснить эффективными мероприятиями по восстановлению древостоев, климатическими сдвигами, способствующими расширению ареала лесов в северном направлении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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.

Ilintsev A.S., Shamontyev 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.2222-7962/2020.3/4>

2. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2021 год: докл. / Центр природопользования и охраны окружающей среды. Архангельск, 2022. 13 с.

*The State and Protection of the Environment in the Arkhangelsk Region for 2021: Report.* The Centre for Nature Management and Environmental Protection, 2022, Arkhangelsk. 13 p. (In Russ.).

3. Тоскунина В.Э. Проблемы лесного комплекса Архангельской области и пути их решения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2008. Вып. 3(3). С. 29–31.

Toskunina V.E. Problems of Timber Complex in the Arkhangelsk Region and Ways of Their Solution. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast, 2008, iss. 3(3), pp. 29–31. (In Russ.).

4. Abdo W. Al-Din. *Introduction to Remote Sensing and its Applications*. University of Dammam, College of Architecture and Planning, 2014. 473 p.

5. *Arab Organization for Agricultural Development. Study of Modern Technologies Used in Developed Countries in the Field of Forest Conservation and Development*. Khar-toum, League of Arab States, 1998. 147 p.

6. Barakat A., Khellouk R., El Jazouli A., Touhami F., Nadem S. Monitoring of Forest Cover Dynamics in Eastern Area of Béni-Mellal Province Using ASTER and Sentinel-2A Multispectral Data. *Geology, Ecology and Landscapes*, 2018, vol. 2, iss. 3, pp. 203–215. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452478>

7. Du P., Samat A., Waske B., Liu S., Li Z. Random Forest and Rotation Forest for Fully Polarized SAR Image Classification Using Polarimetric and Spatial Features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, vol. 105, pp. 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.002>

8. *FAO. The State of the World's Forests 2022: Forest Pathways for Green Recovery and Building Inclusive, Resilient, and Sustainable Economies*. Italy, Rome, FAO, 2022. 166 p. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>

9. Feizizadeh B., Darabi S., Blaschke T., Lakes T. QADI as a New Method and Alternative to Kappa for Accuracy Assessment of Remote Sensing-Based Image Classification. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 12, art. no. 4506. <https://doi.org/10.3390/s22124506>

10. Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik C.J., Monfreda C., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. Global Consequences of Land Use. *Science*, 2005. vol. 309, iss. 5734, pp. 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

11. Gebeyehu M.N. Remote Sensing and GIS Application in Agriculture and Natural Resource Management. *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 2019, vol. 19, iss. 2, art. no. 556009. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2019.19.556009>

12. Kalinaki K., Malik O.A., Lai D.T.C. FCD-AttResU-Net: An Improved Forest Change Detection in Sentinel-2 Satellite Images Using Attention Residual U-Net. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, vol. 122, art. no. 103453. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103453>

13. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J., Mathis M., Brumby S.P. Global Land Use / Land Cover with Sentinel 2 and Deep Learning. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. Belgium, Brussels, 2021, pp. 4704–4707. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>

14. Kayiranga A., Kurban A., Ndayisaba F., Nahayo L., Karamage F., Ablekim A., Li H., Ilniyaz O. Monitoring Forest Cover Change and Fragmentation Using Remote Sensing and Landscape Metrics in Nyungwe-Kibira Park. *Journal of Geoscience and Environmental Protection*, 2016, vol. 4, no. 11, pp. 13–33. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.411003>

15. Kuenzer C., Bluemel A., Gebhardt S., Quoc T.V., Dech S. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. *Remote Sensing*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>

16. Kumar D. Monitoring Forest Cover Changes Using Remote Sensing and GIS: A Global Prospective. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2011, vol. 5, iss. 2, pp. 105–123. <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.105.123>

17. Lu D., Weng Q. A Survey of Image Classification Methods and Techniques for Improving Classification Performance. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28, iss. 5, pp. 823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
18. Mangkhaseum Jr.S., Hanazawa A. Validation of Random Forest Algorithm to Monitor Land Cover Classification and Change Detection Using Remote Sensing Data in Google Earth Engine. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2022, vol. 12177, art. no. 121772L. <https://doi.org/10.1117/12.2626085>
19. Mastrososa S., Crespi M., Congedo L., Munafò M. Land Consumption Classification Using Sentinel 1 Data: A Systematic Review. *Land*, 2023, vol. 12, no. 4, art. no. 932. <https://doi.org/10.3390/land12040932>
20. Mohajane M., Essahlaoui A., Oudija F., El Hafyani M., Teodoro A.C. Mapping Forest Species in the Central Middle Atlas of Morocco (Azrou Forest) through Remote Sensing Techniques. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, vol. 6, no. 9, art. no. 275. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090275>
21. Mohammad H., Al-Bilbisi H., Abu Sammour H. Detection and Analysis of Vegetation Changes Using Spectral Botanical Indicators. *Journal of Humanities and Social Sciences*, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 83–97
22. Niemeyer J., Rottensteiner F., Soergel U. Contextual Classification of Lidar Data and Building Object Detection in Urban Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, vol. 87, pp. 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.001>
23. Panigrahy R.K., Kale M.P., Dutta U., Mishra A., Banerjee B., Singh S. Forest Cover Change Detection of Western Ghats of Maharashtra Using Satellite Remote Sensing Based Visual Interpretation Technique. *Current Science*, 2010, vol. 98, no. 5, pp. 657–664.
24. Petrovska I., Dimov L. Accuracy Assessment of Unsupervised Land Cover Classification. *Scientific Journal of Civil Engineering*, 2020, vol. 9, iss. 2, pp. 83–88. <https://doi.org/10.55302/sjce2092083p>
25. Praticò S., Solano F., Di Fazio S., Modica G. Machine Learning Classification of Mediterranean Forest Habitats in Google Earth Engine Based on Seasonal Sentinel-2 Time-Series and Input Image Composition Optimization. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 4, art. no. 586. <https://doi.org/10.3390/rs13040586>
26. Rodriguez-Galiano V.F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P. An Assessment of the Effectiveness of a Random Forest Classifier for Land-Cover Classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, vol. 67, pp. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
27. Turner II B.L., Lambin E.F., Reenberg A. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *PNAS*, 2007, vol. 104, no. 52, pp. 20666–20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
28. Vanjare A., Omkar S.N., Senthilnath J. Satellite Image Processing for Land Use and Land Cover Mapping. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, 2014, vol. 6, no. 10, pp. 18–28. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2014.10.03>
29. Wang Y., Chen X. The Use of Random Forest to Identify Climate and Human Interference on Vegetation NDVI Changes in Southwest China. *EGU General Assembly 2023*. Austria, Vienna, 2023, art. no. EGU23-2315. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2315>
30. Zhou Y. Research on Forest Resource Change Detection Based on Decision Tree Algorithm. *2022 International Conference on Artificial Intelligence and Autonomous Robot Systems (AIARS)*. United Kingdom, Bristol, 2022, pp. 363–367. <https://doi.org/10.1109/AIARS57204.2022.00088>

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

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