

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

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

3

2023

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ – СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

## **ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

**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)  
**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)  
**Мясищев Д.Г.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**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)  
**Энгельманн Х.-Д.**, д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

# **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

**3**

**2023**

FOUNDER AND PUBLISHER: NORTHERN (ARCTIC)  
FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

## **EDITORIAL BOARD:**

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

## **MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:**

**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)  
**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)  
**Myasishchev D.G.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**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)  
**Engelmann H.-D.**, Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)





## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- А.А. Вайс, Г.С. Вараксин, С.К. Мамедова, Е.А. Анурев, О.А. Герасимова.*  
Детрит в высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири..... 9
- Р.В. Котельников, А.А. Мартынюк.* Математическая оценка достоверности информации о лесных пожарах..... 21
- В.В. Стасова, Л.Н. Скрипальщикова, Н.В. Астраханцева, А.П. Барченков.*  
Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии..... 35
- А.А. Ильинов, Б.В. Раевский.* Микросателлитные локусы в генетической оценке плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* L..... 48
- Ю.А. Сергеева, С.О. Долмонега.* Применение *Ooencyrtus kuvanae* Howard против непарного шелкопряда..... 69
- Т.Е. Галдина, А.И. Чернодубов, М.И. Михайлова.* Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи..... 84
- А.Ю. Карпечко, С.М. Синькевич.* Влияние реконструктивной рубки в лиственнично-еловом древостое на корневую конкуренцию пород..... 99

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- А.М. Бургунутдинов, О.Н. Бурмистрова, В.И. Клевеко, Ю.К. Лицингер.* Использование армогрунта в конструкции устоев деревянного моста лесовозной автомобильной дороги..... 113
- В.И. Посметьев, В.О. Никонов, А.Ю. Мануковский, В.В. Посметьев, А.В. Авдюхин.* Оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда..... 126

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.В. Сергеевичев, В.А. Соколова, А.Е. Михайлова, Е.О. Овчарова, С.А. Войнаш.* Силовой анализ процесса резания единичным зерном сфероко-рунда при шлифовании древесины..... 140

- В.А. Шамаев, О.Ф. Шишов.* Упрочнение и стабилизация форм и размеров древесины осины и тополя карданолом..... 155

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

- Е.А. Топтунов, Ю.В. Севастьянова, К.С. Ваиукова.* Поверхностная обработка картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения..... 162

- Д.А. Прохоров, В.К. Дубовый.* Исследование влияния температурных режимов сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы..... 173

*КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ*

- V.F. Kovyazin, O.Yu. Lepikhina, P.M. Demidova, O.A. Kolesnik, S.O.R. Shobairi, A.T. Nguyen.* Problems of Forest Resource Management in the Arctic Zone of the Russian Federation..... 185

- Е.И. Паршина, О.В. Дымова, Е.В. Титов.* Плантационное выращивание *Pinus sibirica* Du Tour в среднетаежной зоне Республики Коми..... 195
-



## CONTENTS

## FORESTRY

- A.A. Vais, G.S. Varaksin, S.K. Mamedova, E.A. Anuev, O.A. Gerasimova.* Detritus Inside High Density Pine Stands in the Taiga Forest-Steppe Subzone of Central Siberia..... 9
- R.V. Kotelnikov, A.A. Martynyuk.* Mathematical Estimation of Information Reliability Regarding Forest Fires..... 21
- V.V. Stasova, L.N. Skripal'shchikova, N.V. Astrakhantseva, A.P. Barchenkov.* Photosynthetic Pigments in Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) with Technogenic Load..... 35
- A.A. Ilinov, B.V. Raevsky.* Genetic Evaluation by Microsatellite Loci of *Pinus sylvestris* L. Plus Trees..... 48
- Yu.A. Sergeeva, S.O. Dolmonego.* Application of *Ooencyrtus kuvanae* Howard Against Gypsy Moth..... 69
- T.E. Galdina, [A.I. Chernodubov], M.I. Mikhailova.* Intraspecific Diversity of *Pinus sylvestris* L. in Provenance Trials of the Central Russian Forest-Steppe Area..... 84
- A.Yu. Karpechko, S.M. Sinkevich.* Influence of Reconstructive Cutting in Deciduous-Spruce Stands on Root Competition of Species..... 99

## LOGGING TECHNOLOGIES

- A.M. Burgonutdinov, O.N. Burmistrova, V.I. Kleveko, Yu.K. Litsinger.* Application of Reinforced Soil Foundations in the Construction of Wooden Bridge Abutments Along Logging Road..... 113
- V.I. Posmetyev, V.O. Nikonov, A.Yu. Manukovskii, V.V. Posmetyev, A.V. Avdyuhin.* Optimization of Structural Parameters by Improvement of Pneumohydraulic Fifth-Wheel Coupling Device at Semitrailer Hauling Rig..... 126

## MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- A.V. Sergeevichev, V.A. Sokolova, A.E. Mikhailova, E.O. Ovcharova, S.A. Voinash.* Force Analysis of a Single Grain Cutting Process in Wood Grinding Using Spherical Corundum..... 140

- V.A. Shamaev, O.F. Shishlov.* Hardening and Stabilization of Volumetric Properties in Aspen and Poplar Wood with Cardanol..... 155

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

- E.A. Toptunov, Yu.V. Sevastyanova, K.S. Vashukova.* Surface Treatment of Cardboard with Plant and Bacterial Derived Nanocellulose Suspensions..... 162

- D.A. Prokhorov, V.K. Dubovy.* Influence of Drying Temperature on Paper Properties Made of Sulfate-Bleached Softwood and Hardwood Pulps..... 173

*BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE*


- V.F. Kovyazin, O.Yu. Lepikhina, P.M. Demidova, O.A. Kolesnik, S.O.R. Shobairi, A.T. Nguyen.* Problems of Forest Resource Management in the Arctic Zone of the Russian Federation..... 185

- E.I. Parshina, O.V. Dymova, E.V. Titov.* Plantation Cultivation of *Pinus sibirica* Du Tour in the Middle Taiga Subzone of the Komi Republic..... 195
-



Научная статья  
УДК 630.5:582.475(1–925.12)  
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-9-20

### Детрит в высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири

**А.А. Вайс<sup>1</sup>** , *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: AAC-7051-2019*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>*

**Г.С. Вараксин<sup>2</sup>**, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: HNJ-3503-2023*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>*

**С.К. Мамедова<sup>1</sup>**, *аспирант*;

*ResearcherID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3901476>*,


*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>*

**Е.А. Ануев<sup>1</sup>**, *аспирант*; *ResearcherID: AAU-5682-2021*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1822-0795>*

**О.А. Герасимова<sup>1</sup>**, *канд. с.-х. наук*; *ResearcherID: ABF-3094-2020*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-5986>*

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; [vais6365@mail.ru](mailto:vais6365@mail.ru) , [mamedova\\_seva@mail.ru](mailto:mamedova_seva@mail.ru), [djekizion@mail.ru](mailto:djekizion@mail.ru), [goa.1903@yandex.ru](mailto:goa.1903@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, ул. Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; [varaksings@mail.ru](mailto:varaksings@mail.ru)

---


*Поступила в редакцию 28.03.21 / Одобрена после рецензирования 23.06.21 / Принята к печати 25.06.21*

---

**Аннотация.** В настоящее время наблюдается ряд процессов, которые обуславливают воздействие на лесные экосистемы таких неблагоприятных факторов, как лесные пожары, фитопатогенное и инвазивное влияние, изменение климатических условий (повышение температуры). Цель исследования – определение потенциального запаса древесной и углеродной составляющей детрита по основным категориям (сухостой, валеж и пни), а также прогнозирование количества древесных остатков в условиях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири. Исследование крупного детрита проводилось в чистых по составу сосняках. В качестве учетной единицы использовалась круговая площадка постоянного радиуса. Запас сухостоя составил в сосняках 82 % от общего запаса крупного детрита, валежа – 16 % (1,5–18,3 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>), пней – 2 % (0–2,6 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>). Количество детрита не превысило 11 % от общего запаса древостоя. Качество условий местопроизрастания оказывает значительное влияние на запас детрита через интенсивность роста, поскольку в лучших условиях она выше. В древостоях I класса бонитета аккумулируется большая часть крупного древесного детрита (66,4 %), т. е. почти в 2 раза больше, чем в насаждениях, относящихся ко II классу, – 33,6 %. В высокополнотных древостоях (от 0,81 и выше) запас углерода сухостоя, валежа и пней в целом значительно выше, чем в среднеполнотных насаждениях (0,6–0,8). Возраст и средняя высота древостоя являются значимыми показателями для прогнозирования запасов древесины и углерода сухостоя.

---

© Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Ануев Е.А., Герасимова О.А., 2023

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

Количество древесины и углерода валежа зависит также от полноты и общего запаса древесины в насаждении. Получены регрессионные уравнения, позволяющие спрогнозировать объем крупного древесного детрита. Таким образом, в исследуемых древостоях наблюдаются деструктивные процессы (крупный древесный детрит), которые вызваны как влиянием возрастной структуры (вступлением древостоев в стадию спелости и перестойности), так и биогенными факторами, причина которых – снижение устойчивости лесных массивов под воздействием патогенеза и климатических изменений.

**Ключевые слова:** крупный древесный детрит, сосна обыкновенная, запас крупного детрита, сухостой, валеж, пни, углерод, Средняя Сибирь

**Благодарности:** Исследование проводилось коллективом научной лаборатории «Лесных экосистем» в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по реализации проекта «Оценка устойчивости лесных экосистем к изменению климата как основа мониторинга углеродного бюджета» (FEFE-2021-0018).

**Для цитирования:** Вайс А.А., Вараксин Г.С., Мамедова С.К., Ануев Е.А., Герасимова О.А. Детрит в высокополнотных сосновых насаждениях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 9–20. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-9-20>

Original article

### Detritus Inside High Density Pine Stands in the Taiga Forest-Steppe Subzone of Central Siberia

**Andrey A. Vais**<sup>1✉</sup>, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-7051-2019](https://orcid.org/0000-0003-4965-3670),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4965-3670>

**Gennady S. Varaksin**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HNJ-3503-2023](https://orcid.org/0000-0003-4335-4784),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4335-4784>

**Sevinch K. Mamedova**<sup>1</sup>, Postgraduate Student;  
ResearcherID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3901476>,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9972-0021>

**Evgenij A. Anuev**<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAU-5682-2021](https://orcid.org/0000-0002-1822-0795),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1822-0795>

**Olga A. Gerasimova**<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [ABF-3094-2020](https://orcid.org/0000-0001-6498-5986),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-5986>

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeni gazety “Krasnoyarskiy Rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; [vais6365@mail.ru](mailto:vais6365@mail.ru)<sup>✉</sup>, [mamedova\\_ceva@mail.ru](mailto:mamedova_ceva@mail.ru), [djekizion@mail.ru](mailto:djekizion@mail.ru), [goa.1903@yandex.ru](mailto:goa.1903@yandex.ru)

<sup>2</sup>Sukachev Institute of Forest of SB RAS, ul. Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [varaksins@mail.ru](mailto:varaksins@mail.ru)

Received on March 28, 2021 / Approved after reviewing on June 23, 2021 / Accepted on June 25, 2021

**Abstract.** At the present time, certain harmful effects are observed that affect forest ecosystems. They are forest fires, phytopathogenic activities, and invasive influence, in addition to changes in climatic conditions, in particular an increase in temperature. The study is intended to determine the potential stock of wood and carbon compounds in detritus. The principal categories for it are snags, downed dead wood, and stumps. Additionally, it predicts the amount of wood residues in the conditions of the taiga forest-steppe subzone of Central



Siberia. A coarse woody detritus was examined in the structurally pure forests of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). A circular area of constant radius was used as an accounting unit. The coarse woody detritus in snag was 82 %, in downed dead wood was 16 % ( $1.5\text{--}18.3\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ), in stumps was 2 % ( $0\text{--}2.6\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ). The content of detritus was found in only 11 % of the total stock of the stand. The environmental quality at the location of growth had a strong effect on the amount of detritus because of the growth rate of the trees, which is higher in the ideal conditions. Most of the coarse woody detritus (66.4 %) was accumulated in the stands of productivity class I, which was almost double that in the stands of productivity class II (33.6 %). The carbon content in snags, downed dead wood, and stumps was higher in high-density stands (0.81 or more) than in medium-density stands (0.6–0.8). The age and average height of the stand were considerable indicators for predicting stocks of wood and carbon in snags. The amount of wood and carbon in the downed dead wood also depended on the growth density and total stock of wood at the location. The regression equations were generated to predict the volume of the coarse wood detritus. According to the results, it can be concluded that in the investigated stands the destructive processes were identified, which were determined by the concentration of detritus. The production of detritus was activated by both age composition, when a major part of the trees enters the mature or overmature stages, and biogenic factors, which were stimulated by pathogenesis and climatic changes.

**Keywords:** coarse woody detritus, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), coarse woody detritus stock, snag, downed dead wood, stump, carbon, Central Siberia

**Acknowledgements:** The study was performed by the research laboratory team of “Forest Ecosystems” as a part of the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as implementation of the project “Assessment of Forest Ecosystems Resilience Under Climate Change as a Basis of Carbon Budget Monitoring” (FEFE-2021-0018).

**For citation:** Vais A.A., Varaksin G.S., Mamedova S.K., Anuev E.A., Gerasimova O.A. Detritus Inside High Density Pine Stands in the Taiga Forest-Steppe Subzone of Central Siberia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 9–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-9-20>

### Введение

Крупный древесный детрит (КДД) в виде крупных древесных остатков (КДО) или древесного опада играет важную роль в системе разложения мертвой древесины и углеродном балансе лесных экосистем [11, 19]. КДД лесного насаждения – это сухостой, пни, валеж диаметром в нижнем отрезе 10 см и более – мертвое древесное вещество (мортмасса) всех стадий разложения до перехода в гумус [19, 26]. Преобладающей частью детрита является запас сухостоя. Причины образования КДД различны – от естественных и незначительных (конкуренция, болезни, старение растений) до случайных и массовых (ветровалы, вспышки размножения вредителей, пожары и др.) [17]. В результате воздействия как природных (лесные пожары), так и антропогенных факторов (рубка насаждений, промышленное загрязнение) и ухудшения санитарного состояния насаждений на лесных территориях увеличиваются запасы КДД [1–3, 6, 22–24, 27, 28].

Вопросы исследования КДД находятся в центре внимания зарубежных и российских ученых. В.Г. Стороженко, изучая понятие «древесный отпад», предлагает считать его компонентом биоценоза под названием «мортценоз» [18]. Проблема оценки запасов мертвой древесины актуальна для определения эмиссии углерода и изучения процессов круговорота веществ в лесных экосистемах. Структурные особенности КДД важны с точки зрения оценки интенсивности



эмиссионных процессов. Ряд авторов считает, что детрит в сосновых насаждениях является критерием оценки санитарного состояния, экологической и пирологической характеристик [15, 16, 21, 25, 30].

Оценка лесных массивов средствами государственной инвентаризации лесов, научные изыскания исследователей позволили для Российской Федерации получить первичные данные о запасах древесного детрита [4, 9, 13, 18]. Д.Г. Замолотчиков, Н.В. Зукерт, О.В. Честных на основе анализа сведений Государственного лесного реестра установили, что углерод сухостоя составляет 21–42 % от общего пула КДО [7]. Оценка углерода валежа представлена в работах В.И. Грабовского (и др.), А.В. Иванова (и др.) N.A. Scott (et al.), L. Zhou (et al.) [5, 8, 29, 30]. С использованием коэффициентов для перевода объема в массу углерода получена средняя величина пула углерода валежа – 8,3 тС·га<sup>-1</sup> [8]. Выявлена тенденция к увеличению запасов углерода этой категории с возрастом насаждения.

Состояние вопроса показывает, что преимущественно исследования детрита сконцентрированы в европейской части РФ, по Сибирскому региону данных недостаточно и требуется дополнительное изучение запасов КДО.

Цель исследования – определение потенциального запаса древесной и углеродной составляющей детрита по основным категориям (сухостой, валеж и пни), а также прогнозирование количества древесных остатков в условиях подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

#### *Объекты и методы исследования*

Объект исследования – территория в прибрежной части р. Енисей, в пригородной зоне г. Красноярск. Местность расположена в условиях Средней Сибири в подтаежно-лесостепном районе. Основной лесообразующей породой здесь является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Доля участия березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и осины обыкновенной (*Populus tremula* L.) в сосновых древостоях незначительна, поэтому исследование КДД проводилось в чистых по составу сосняках.

В качестве учетной единицы использовалась круговая площадка постоянного радиуса [14]. Выбор обусловлен тем, что сосняки опытного объекта характеризуются высокими густотой и полнотой [10]. На каждом лесном участке закладывалось равномерно по площади по 3 круговых площадки. Радиус одной площадки составил 13,75 м (площадь – 594 м<sup>2</sup>). Работы по учету КДО выполнялись на территории 18 лесных участков с общим количеством площадок 54 шт. в период с 1 июля по 15 октября 2021 г. У каждого дерева в соответствии с традиционными методиками измерялись диаметр на высоте груди, высоты части растущих и сухостойных деревьев, устанавливалась категория состояния (1–5 категории). Данные учета затем объединялись и представлялись в итоговом виде.

Учет КДД осуществлялся в соответствии с методическими положениями [11]. Данные замеров записывались в специальную форму ведомости. В учет включались стволы сухостоя и валеж с диаметром у основания 10 см и более, длиной 1 м и более, а также пни хозяйственного происхождения с диаметром среза, превышающим 10 см. В случае, если ствол валежа попадал на площадку не полностью, учитывалась только его часть, расположенная на площадке. Объемы каждого ствола валежа и сухостоя, а также пней рассчитывались по таблицам объемов или при помощи других применяемых в лесной таксации способов.



Анализировалась площадочная характеристика лесных участков по запасу детрита ( $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ), массе детрита ( $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ ) и запасу углерода детрита ( $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ).

Для определения массы детрита использовалась базисная плотность древесины (БП), являющаяся показателем степени разложения мертвой древесины:

$$M = Vd \cdot \text{БП},$$

где  $M$  – масса детрита,  $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $Vd$  – запас детрита,  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ .

Значения БП по главной породе (сосна) брались из справочного материала по детриту [11]. Так, БП сосны для сухостоя и пней составляет 0,316, для валежа – 0,234. Для перевода массы детрита в запас углерода мертвой древесины применялся конверсионный коэффициент (0,5).

После сбора данных выполнялась их камеральная обработка. Для этого использовались электронная таблица Excel, статистический пакет Statgraphics, «Справочник таксатора» [20] с нормативными таблицами, отражающими рост насаждений в условиях Средней и Южной Сибири.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

На отдельных площадках запас сухостоя варьировал от 7,6 до 120,6  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , максимальное значение характерно для круговой площадки 9-го участка, где наблюдалось очаговое усыхание деревьев сосны. Запас валежа изменялся в меньшей степени – от 0 до 32,6  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ . Минимальный запас детрита в сосновых древостоях приходился на пни – от 0 до 5,24  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , поскольку территория опытного объекта относится к защитным лесам и факты рубок носят ограниченный характер, присутствуют лишь пни от естественного изреживания. Для дальнейшего анализа данных использовались обобщенные характеристики лесных участков (табл. 1): запас сухостоя – 19,9–73,5  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , валежа – 1,5–18,3  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , пней – 0–2,6  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ .

По данным других исследований, запас сухостоя в сосновых насаждениях России меняется в широких пределах [7, 11]. При этом средний показатель в управляемых лесах для условий лесостепной зоны Западной Сибири составляет 10,4  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [13]. В условиях хвойно-широколиственных насаждений Южного Приморья количество валежа – 17–83  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  (17 % запаса). Среднее значение для условий лесостепной зоны Западной Сибири – 12,0  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [13], что в целом соответствует результатам наших исследований. Среднее значение запаса пней – 0,70  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [13].

Запас углерода сухостоя на всех пробных площадках варьировал от 0,9 до 19,0  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , валежа – от 0,2 до 3,8  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , пней – от 0,05 до 0,83  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . Средние показатели запаса углерода составили в сухостое 2,5–11,6  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , в валеже – 0,2–2,2  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , в пнях – 0,05–0,42  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . Запас углерода сухостоя преобладал на 9-м и 12-м лесных участках (11,6  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ), запас углерода валежа – на 14-м (2,2  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ), запас углерода пней – на 17-м (0,42  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ). В соответствии с другими источниками, количество сухостоя зависит от возраста насаждений и в спелых и перестойных сосняках России объем углерода в сухостое находится на уровне 8,9–13,2  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$  [7].

Суммарный запас углерода КДД, включая запас углерода в сухостое, валеже и пнях, свидетельствует о том, что данный показатель лесных участков находится в пределах 3,2–13,4  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . На 12-м участке наблюдался максимальный запас углерода в КДД – 13,4  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ . По данным Э.А. Курбанова, О.Н. Кранкиной [12], в спелых сосняках Среднего Заволжья запас углерода КДД составил 8,6–24,5  $\text{тС} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Таблица 1

Характеристика лесных участков и детрита на них  
Characteristics of forest trail plots and detritus on them

Номер участка	Тип леса	Возраст, лет	Полнота	Бонитет	Запас растущего леса, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	Запас детрита, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$			Масса детрита, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$			Запас углерода мертвой древесины, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$			Всего
						С	В	П	С	В	П	С	В	П	
1	$\text{C}_{\text{спос}}$	105	0,61	I	235	29,3	1,8	1,02	9,3	0,4	0,32	4,6	0,2	0,16	5,0
2	$\text{C}_{\text{спос}}$	130	0,99	II	393	34,4	12,2	0,37	10,9	2,9	0,12	5,4	1,4	0,06	6,9
3	$\text{C}_{\text{спос}}$	150	0,98	II	425	22,6	8,4	0,35	7,1	2,0	0,11	3,6	1,0	0,06	4,6
4	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,04	I	419	23,4	5,0	0,70	7,4	1,2	0,22	3,7	0,6	0,11	4,4
5	$\text{C}_{\text{осрт}}$	170	0,71	II	282	19,0	7,4	1,04	6,0	1,7	0,33	3,0	0,9	0,16	4,0
6	$\text{C}_{\text{осрт}}$	140	1,28	II	517	33,6	13,6	0,63	10,6	3,2	0,20	5,3	1,6	0,10	7,0
7	$\text{C}_{\text{осрт}}$	105	1,42	I	570	49,5	14,8	0,23	15,6	3,5	0,07	7,8	1,7	0,04	9,6
8	$\text{C}_{\text{прос}}$	130	1,31	II	525	44,2	14,5	2,21	14,0	3,4	0,70	7,0	1,7	0,35	9,0
9	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,44	I	643	73,5	7,9	0,94	23,2	1,9	0,30	11,6	0,9	0,15	12,7
10	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,33	I	589	49,5	4,8	0,96	15,6	1,1	0,30	7,8	0,6	0,15	8,5
11	$\text{C}_{\text{спос}}$	130	0,80	I	353	48,1	10,8	0,35	15,2	2,5	0,11	7,6	1,3	0,06	8,9
12	$\text{C}_{\text{осрт}}$	120	0,89	I	390	73,5	14,3	0,56	23,2	3,3	0,18	11,6	1,7	0,09	13,4
13	$\text{C}_{\text{осрт}}$	115	0,93	I	375	61,0	1,5	0,47	19,3	0,3	0,15	9,6	0,2	0,07	9,9
14	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,32	I	533	32,5	18,6	0	10,3	4,3	0	5,1	2,2	0	7,3
15	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,21	II	464	19,9	18,3	0	6,3	4,3	0	3,1	2,1	0	5,3
16	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	0,64	II	231	15,9	5,4	0	5,0	1,3	0	2,5	0,6	0	3,2
17	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,05	I	461	29,5	18,2	2,63	9,3	4,3	0,83	4,7	2,1	0,42	7,2
18	$\text{C}_{\text{осрт}}$	130	1,11	II	464	21,6	4,2	0,68	6,8	1,0	0,21	3,4	0,5	0,11	4,0

Примечание:  $\text{C}_{\text{спос}}$ ,  $\text{C}_{\text{осрт}}$ ,  $\text{C}_{\text{прос}}$  – сосняки спрейно-осочковый, осочково-разногравный и прострелово-осочковый соответственно; С – сухойстой; В – валеж; П – пни.

Доля запаса углерода сухостоя от общего запаса углерода КДД – 82,2 %, валежа – 16,2 %, пней – 1,6 %. Запас детрита в зависимости от категории мертвой древесины (сухостой, валеж, пни) не превысил 11 % от запаса древостоя. Так, запас сухостоя в среднем составляет 8,7 % от запаса древостоя, запас валежа – 2,3 %, а запас пней – 0,2 %.

Для определения зависимости запаса углерода КДД от условий местопроизрастания данные распределялись по классам бонитета (табл. 1). Оказалось, что большая часть сухостоя приходится на I класс бонитета (69,0 % от запаса углерода всего сухостоя). Незначительная разница в запасах между двумя классами бонитета наблюдалась для валежа (I класс – 53,8 % и II класс – 46,2 % от общего запаса углерода валежа) и пней (I класс – 59,9 % и II класс – 40,1 % от запаса углерода пней) (рис. 1).

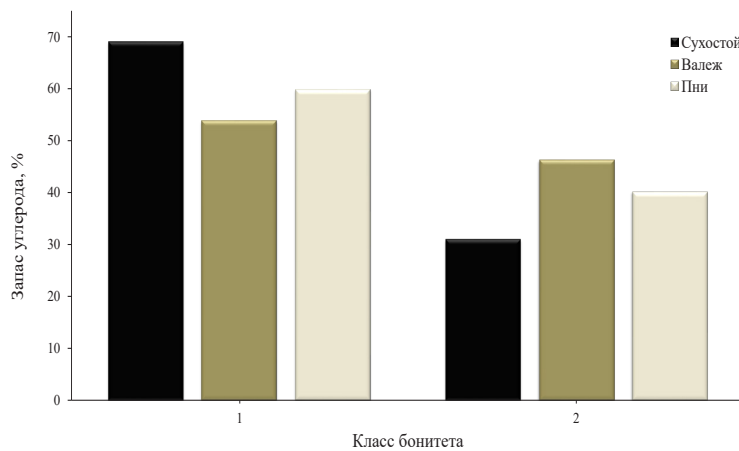


Рис. 1. Распределение запаса углерода детрита по классам бонитета

Fig. 1. Distribution of detritus carbon stock by productivity classes

В древостоях I класса бонитета больше отпада, так как сухостой составляет 56,7 % от общего запаса углерода КДД. Это можно объяснить тем, что лучшие условия произрастания и, соответственно, большая интенсивность роста деревьев обуславливают высокую вероятность изреживания и усыхания отдельных древесных пород. Конкуренция за площадь питания возрастает. В насаждениях, характеризующихся I классом бонитета, отмечается большая часть КДД (66,4 %), это почти в 2 раза выше, чем для древостоев II класса бонитета, – 33,6 %.

С целью оценки связи запаса углерода КДД и полноты древостоя использовалась как табличная (табл. 1), так и графическая (рис. 2) форма представления данных. Большая часть детрита сконцентрирована на тех лесных участках, где полнота древостоя выше 1,21. Зависимость запаса углерода детрита от полноты неоднозначна, но можно утверждать, что в высокополнотных древостоях (от 0,81 и выше) запас углерода сухостоя, валежа, пней в целом значительно выше, чем в среднеполнотных насаждениях (0,6–0,8). Установлено, что чем выше полнота ( $p$ ) древостоя, тем интенсивнее происходит процесс усыхания отдельных деревьев, приводящий к образованию отпада и КДО. При  $p > 1,21$  запас углерода сухостоя составляет 44,4 % от общего КДД данной категории, запас углерода валежа – 50,9 % (соответственно валежа), запас углерода пней – 37,8 % (применительно к пням) (рис. 2). Запас суммарного углерода КДД при  $p = 0,81–1,0$  – 26,6 %, а при  $p > 1,21$  – 45,4 %.

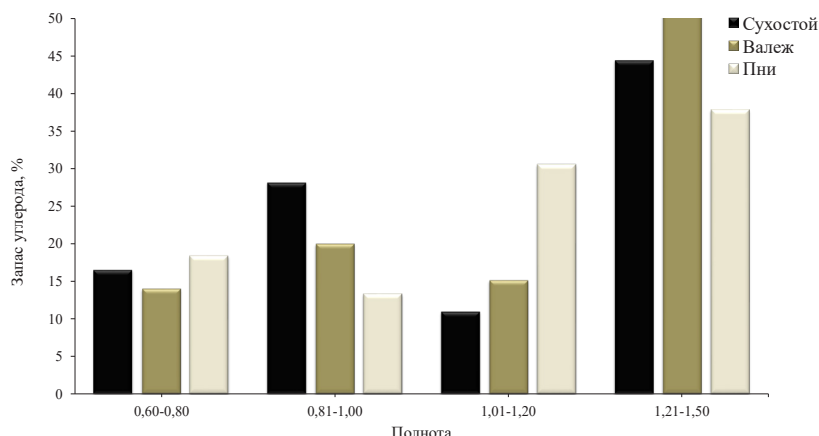


Рис. 2. Распределение запаса углерода детрита по соснякам разной полноты

Fig. 2. Distribution of detritus carbon stock by pine stand with various density

Прогнозирование запаса детрита и углерода в нем имеет важное значение для оценки эмиссионных процессов лесных экосистем. С этой целью на предварительном этапе с помощью корреляционного и факторного анализа отобраны значимые переменные для последующей регрессионной оценки КДД (табл. 2). Для прогнозирования запасов древесины и углерода сухостоя значимыми оказались две переменные: возраст и средняя высота древостоя, – которые определяют около 80 % всех факторов, влияющих на количество сухостоя. Возраст оценивает качественное состояние лесной экосистемы, а средняя высота – размерные параметры составляющей насаждения. Количество древесины и углерода валежа зависит от полноты и общего запаса древесины в насаждении (60 % из всего комплекса факторов влияния).

Таблица 2

**Регрессионные уравнения для оценки древесных ( $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ ) и углеродных ( $\text{тС}\cdot\text{га}^{-1}$ ) запасов крупного детрита**  
**Regression equations for estimating wood ( $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ ) and carbon ( $\text{тС}\cdot\text{га}^{-1}$ ) reserves of coarse woody detritus**

Уравнение	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации, %
<i>Запас КДД</i>		
$Z_c = 0,751A + 5,275H$	0,90	81,3
$Z_b = 9,093p$	0,75	56,2
$Z_n = 0,032p$	0,54	28,8
<i>Запас углерода в КДД</i>		
$C_c = 0,008AH - 0,001A^2$	0,90	80,3
$C_b = 0,0043 + 2,838p^2 - 0,008p \cdot Z$	0,77	59,9

Примечание:  $Z_c \pm 19,4$ ;  $Z_b \pm 9,1$ ;  $Z_n \pm 1,2$  – запас сухостоя, валежа и пней соответственно с основной ошибкой ( $\pm$ ) при заданном уровне доверительной вероятности;  $C_c \pm 3,1$ ;  $C_b \pm 1,0$  – запас углерода в сухостое и валеже с основной ошибкой соответственно;  $A$  – возраст древостоя, лет;  $H$  – средняя высота, м;  $Z$  – запас древесины,  $\text{м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ . Диапазон действия уравнений для  $A$  – 95–150 лет; для  $H$  – 19,8–25,8 м; для  $p$  – 0,53–1,64. Все коэффициенты уравнения значимы ( $p < 0,05$ ). Уровень доверительной вероятности – 95,4 %. Все уравнения достоверны ( $F_{\phi} \geq F_{\text{табл}}$ ;  $F_{\phi} = 21-113$ ).

Прогнозирование запаса древесины и углерода пней сложно выполнимо из-за случайности наличия данного объекта и многофакторности его образования. Если запас древесины пней частично определяется полнотой (29 %), то углерод древесной части пней целесообразно представить как среднюю величину ( $0,30 \text{ тС} \cdot \text{га}^{-1}$ ). На этом основании для установления запаса углерода пней (в случае их наличия на территории) предлагается использовать средний параметр:  $0,296 \pm 0,192 \text{ тС} \cdot \text{га}^{-1}$ , с изменчивостью признака  $V = 64,7\%$ . Оценка получена при уровне доверительной вероятности 95,4 %.

Регрессионные уравнения позволяют определить потенциальный объем эмиссионных процессов древесной части в сосняках подтаежно-лесостепного района Средней Сибири.

### *Заключение*

В настоящее время лесные пожары, фитопатогенное и инвазивное влияние, глобальное потепление обуславливают увеличение интенсивности отпада и формирование крупного древесного детрита. На основании проведенных исследований для чистых сосняков подтаежно-лесостепного района Средней Сибири получены данные о запасах древесного и углеродного пула крупных древесных остатков.

1. Запас сухостоя составляет в сосняках более 80 % от общего запаса крупного детрита. В абсолютных единицах такое значение превышает данные других исследователей о среднем запасе сухостоя более чем в 2 раза. Это объясняется наличием значительного числа высокополнотных насаждений, что является причиной дифференциации и изреживания древостоев.

2. Наши данные о количестве валежа и пней совпадают с данными, полученными другими учеными: запас валежа – 16 %, пней – 2 % от запаса детрита.

3. Качество условий местопроизрастания оказывает значительное влияние на запас детрита: в лучших условиях выше интенсивность роста, следовательно, в древостоях, относящихся к I классу бонитета, аккумулируется бóльшая часть КДД.

4. Запас углерода сухостоя, валежа, пней находится в прямой зависимости от полноты древостоя: чем она выше, тем выше запас углерода детрита (на примере сравнения высокополнотных и среднеполнотных древостоев).

Для прогнозирования запасов древесины и углерода сухостоя и валежа предлагается использовать парные и множественные линейные уравнения с достаточно высоким уровнем адекватности и достоверности. Запасы древесины и углерода пней целесообразно представить как средние величины.

Таким образом, выполнена оценка потенциального запаса древесной и углеродной составляющей детрита, а также представлены регрессионные уравнения для прогнозирования количества древесных остатков. В исследованных высокополнотных сосновых древостоях протекают деструктивные процессы – растет количество крупного древесного детрита, что обусловлено возрастной структурой древостоев (их вступлением в стадию спелости и перестойности), а также уменьшением устойчивости лесных массивов по причине патогенеза и климатических изменений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алейников А.А., Тюрин А.В., Грабарник П.Я., Ефименко А.С. Характеристика древостоя и валежа в послепожарных осиново-березовых лесах Среднего Предуралья // Лесоведение. 2018. № 4. С. 258–272.  
Aleynikov A.A., Tyurin A.V., Grabarnik P.Ya., Efimenko A.S. Features of the Stand and Deadwood in Postfire Aspen and Birch Forests in Northern Urals. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 4, pp. 258–272. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114818040034>
2. Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л., Усольцев В.А. Структура отпада елово-пихтовых древостоев в условиях загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода // Сиб. лесн. журн. 2015. № 2. С. 20–32.  
Bergman I.E., Vorobeychik E.L., Usoltsev V.A. The Structure of Spruce-Fir Tree Stands Mortality Under Impact of the Middle Ural Copper Smelter Emissions. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 20–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150202>
3. Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесосечных рубках ельников средней тайги // Лесоведение. 2012. № 6. С. 44–54.  
Bobkova K.S., Likhanova N.V. Losses of Carbon and Mineral Nutrients in Clear Cuttings of Spruce Forests in the Middle Taiga. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 6, pp. 44–54. (In Russ.).
4. Ведрова Э.Ф., Кошурникова Н.Н. Масса и состав фитодетрита в темнохвойных лесах южной тайги // Лесоведение. 2007. № 5. С. 3–11.  
Vedrova E.F., Koshurnikova N.N. Mass and Composition of Phytodetrites in Dark Coniferous Forests of Southern Taiga. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2007, no. 5, pp. 3–11. (In Russ.).
5. Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г. Модели оценки запасов валежа по данным учетов на трансектах // Лесоведение. 2012. № 2. С. 66–73.  
Grabovsky V.I., Zamolodchikov D.G. Models of Estimating Slash Reserves According to Data Obtained on Transects. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 2, pp. 66–73. (In Russ.).
6. Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.  
Zamolodchikov D.G. Assessment of the Carbon Pool of Large Wood Residues in the Forests of Russia Considering the Impact of Fire and Logging. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2009, no. 4, pp. 3–15. (In Russ.).
7. Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В. Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 61–71.  
Zamolodchikov D.G., Zukert N.V., Chestnykh O.V. Methods for Evaluating Carbon in Dead Wood of Russian Forests. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2011, no. 5, pp. 61–71. (In Russ.).
8. Иванов А.В., Приходько О.Ю., Демченко Р.В. Запасы валежа в естественных насаждениях хвойно-широколиственных лесов южного Приморья // Тр. СПбНИИЛХ. 2016. № 2. С. 17–28.  
Ivanov A.V., Prikhodko O.Yu., Demchenko R.V. Windfall Stock in the Natural Stands of Mixed Coniferous and Deciduous Forests in the South of Primorye. *Trudy SPB-NIILH* = Proceedings of SPBFRI, 2016, no. 2, pp. 17–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.16>
9. Катица Е.А., Шорохова Е.В., Кузнецов А.А. Пул углерода крупных древесных остатков в коренных лесах северо-запада Русской равнины // Лесоведение. 2012. № 5. С. 36–43.



Kapitsa E.A., Shorokhova E.V., Kuznetsov A.A. Carbon Pool of Large Wood Residues in Native Forests of the Northwestern Russian Plain. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 5, pp. 36–43. (In Russ.).

10. Кокорина Е.Г., Вайс А.А. Эскиз таблицы хода роста модальных сосновых насаждений на основе принципов динамической типологии // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 4. С. 257–262.

Kokorina E.G., Vais A.A. Sketches, Tables of Growth of Modal Pine Stands on the Principles of Dynamic Typology. *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2021, vol. 39, no. 4, pp. 257–262. (In Russ.).

11. Кранкина О.Н., Поваров Е.Д. Методика определения запасов и массы древесного детрита на основе данных лесоустройства. Пушкино: ВНИИЛМ, 2002. 44 с.

Treifeld R.F., Krankina O.N., Povarov E.D. *Methodology for Determination of Woody Detritus Stocks and Weights According to Forest Surveying Data*. Moscow, VNIILM Publ., 2002, 44 p. (In Russ.).

12. Курбанов Э.А., Кранкина О.Н. Древесный детрит в сосновых насаждениях Среднего Заволжья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 4. С. 28–33.

Kurbanov E.A., Krankina O.N. Wood Detritus in Pine Stands of Middle Volga Area. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2001, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c95/c9506e010d2474a12eba7ff43d6b1f06.pdf>

13. Малышева Н.В., Филипчук А.Н., Золина Т.А., Сильнягина Г.В. Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах Российской Федерации по данным ГИЛ // Лесхоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 1. С. 101–128.

Malysheva N.A., Filipchuk A.N., Zolina T.A., Silnyagina G.V. Quantitative Estimation of Woody Detritus Stocks in Forests of the Russian Federation According to the Global Forest Inventory. *Lesohozyajstvennaya informaciya* = Forestry Information, 2019, no. 1, pp. 101–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.09>

14. Наставление по отводу и таксации лесосек в лесах Российской Федерации: утв. приказом Федер. службы лесн. хоз-ва РФ от 15 июня 1993 г. № 155.

Manual on Allocation and Inventory of Cutting Areas in the Forests of the Russian Federation. *Registered by the Federal Forestry Service of the Russian Federation on June 15, 1993, No. 155*. (In Russ.).

15. Павлов И.Н., Барабанова О.А., Кулаков С.С., Юшкова Т.Ю., Агеев А.А., Пашенова Н.В., Тарасов П.А., Шевцов В.В., Иванова Т.Н. К вопросу образования очагов куртинного усыхания сосны обыкновенной на старопашотных землях (роль корневой губки, эдафических факторов и изменения климата) // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27, № 3–4. С. 263–272.

Pavlov I.N., Barabanova O.A., Kulakov S.S., Yushkova T.Yu., Ageyev A.A., Pashenova N.V., Tarasov P.A., Shevtsov V.V., Ivanova T.N. On the Source Formation of Drying Clusters of Scots Pine on Old Arable Lands (Role of Root Fungus, Edaphic Factors, and Climate Change). *Hvojnye boreal'noj zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. 27, no. 3–4, pp. 263–272. (In Russ.).

16. Портянко А.В., Залесов С.В., Данчева А.В. Древесный детрит в сосновых насаждениях Казахского мелкосопочника как показатель оценки санитарного состояния, экологической и пирологической характеристик // Леса России и хозяйство в них. 2011. № 4(41). С. 45–52.

Portyanko A.V., Zalesov S.V., Dancheva A.V. Woody Detritus in the Kazakh Hills of Pine Plantations as an Indicator of Health Status Assessment, Environmental and Pyrological Characteristics. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih* = Forests of Russia and Economy in Them, 2011, no. 4(41), pp. 45–52. (In Russ.).

17. Сергиенко В.Г., Власов Р.В., Иванов А.М. Общие вопросы сохранения биологического разнообразия в хвойных древостоях Северо-Запада России при проведении рубок // Тр. СПбНИИЛХ. 2015. № 2. С. 4–19.

Sergienko V.G., Vlasov R.V., Ivanov A.M. General Issues of Biodiversity Conservation in Coniferous Stands of Northwestern Russia at Wood Harvesting. *Trudy SPB-NILH = Proceedings of SPbFRI*, 2015, no. 2, pp. 4–19. (In Russ.).

18. Стороженко В.Г. Характеристика древесного опада в коренных ельниках восточноевропейской тайги // Лесоведение. 2012. № 3. С. 43–50.

Storozhenko V.G. Characterization of Current Deadwood and Slash in Natural Spruce Forests of East European Taiga. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2012, no. 3, pp. 43–50. (In Russ.).

19. Тарасов М.Е. Роль крупного древесного детрита в балансе углерода лесных экосистем Ленинградской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 1999. 21 с.

Tarasov M.E. *Role of Coarse Woody Detritus in Carbon Balance of Forest Ecosystems of the Leningrad Region*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Sankt Petersburg, SPbLTA Publ., 1999. 21 p. (In Russ.).

20. Шевелев С.Л., Кузьмичев В.В., Павлов Н.В., Смольянов А.С. Лесотаксационный справочник для южно-таежных лесов Средней Сибири. М.: ВНИИЛМ, 2002. 166 с.

Shevelev S.L., Kuzmichev V.V., Pavlov N.V., Smolyanov A.S. *Taxation Manual for the Southern Taiga Forests of Middle Siberia*. Moscow, VNIILM Publ., 2002. 166 p. (In Russ.).

21. Brown S. Measuring Carbon in Forests: Current Status and Future Challenges. *Environmental Pollution*, 2002, vol. 116, no. 3, pp. 363–372. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3)

22. Dickinson C.H., Pugh G.J.F. *Biology of Plant Litter Decomposition*. London, Academic Press Publ., 1974. 775 p.

23. Fridman J., Walheim M. Amount, Structure and Dynamics of Dead Wood on Managed Forestland in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 131, no. 1-3, pp. 23–36. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00208-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00208-X)

24. Gore J.A., Patterson III W.A. Mass of Downed Wood in Northern Hardwood Forests in New Hampshire: Potential Effects of Forest Management. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, vol. 16, no. 2, pp. 335–339. <https://doi.org/10.1139/x86-057>

25. Harmon M.E., Sexton J. *Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems*. USA, Seattle, WA. U.S. LTER Network Office Publ., 1996, no. 20. 73 p.

26. Harmon M.E., Franklin J.F., Swanson F.J., Sollins P., Gregory S.V., Lattin J.D., Anderson N.H., Cline S.P., Aumen N.G., Sedell J.R., Lienkaemper G.W., Cromack Jr. K., Cummins K.W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, vol. 15, pp. 133–302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60121-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60121-X)

27. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the Dead Wood Carbon Pool in Northwestern Russian Boreal Forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, vol. 82, no. 1-2, pp. 227–238. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01182836>

28. Norden B., Gotmark F., Tonneberg M., Ryberg M. Dead Wood in Semi-Natural Temperate Broadleaved Woodland: Contribution of Coarse and Fine Dead Wood, Attached Dead Wood and Stumps. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 194, no. 1-3, pp. 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.043>

29. Scott N.A., Brown S. Measuring the Decomposition of Down Dead-Wood. *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. Netherlands, Springer Publ., 2008. pp. 113–126. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8506-2\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8506-2_9)

30. Zhou L., Dai L., Gu H., Zhong L. Review on the Decomposition, and Influence Factors of Coarse Woody Debris in Forest Ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 48–54. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-007-0009-9>

**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\*614.849

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-21-34

## Математическая оценка достоверности информации о лесных пожарах

**Р.В. Котельников**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук; *ResearcherID*: [B-2453-2018](https://orcid.org/0000-0002-9984-5913),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5913>

**А.А. Мартынюк**, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; [kotelnikovrv@firescience.ru](mailto:kotelnikovrv@firescience.ru)<sup>✉</sup>, [vniiilm\\_martinuk@mail.ru](mailto:vniiilm_martinuk@mail.ru)

Поступила в редакцию 03.04.21 / Одобрена после рецензирования 28.06.21 / Принята к печати 30.06.21

**Аннотация.** Бурное развитие цифровых технологий в целом и методов обработки больших данных в частности открывает широкие возможности для получения новых алгоритмов информационной поддержки управленческих решений, в том числе в области охраны лесов от пожаров. На этом фоне существенно возрастают требования к точности данных о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах. Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса хоть и являются перспективным методом получения независимой от человеческого фактора информации, имеют пока ряд технических ограничений, не позволяющих полностью автоматизировать сбор информации, поэтому важно обеспечить всесторонний контроль сведений, поступающих от лесопожарных формирований. Кроме того, для долгосрочных прогнозов пожарной опасности необходимо учитывать ретроспективные данные и цикличность некоторых явлений. Это требует разработки методик оценки достоверности исходных данных. Анализ сведений о количестве лесных пожаров, возникших в Российской Федерации с 1969 по 2020 г., позволил выявить, что распределение значений в больших выборках близко к логнормальному. Это, по мнению авторов, является фундаментальным принципом. Небольшие отклонения в правой части распределения косвенно подтверждают гипотезу о возможном дроблении крупных лесных пожаров лицами, предоставляющими информацию. Это также согласуется с тем, что такое дробление обычно имеет смысл только при сложной лесопожарной ситуации (большом количестве лесных пожаров). Анализ данных о количестве лесных пожаров, ликвидированных в первые сутки, выявил характерное отклонение, которое косвенно доказывает гипотезу о вероятности искажения данных с целью улучшения отчетности. При этом характер отклонения согласуется с тем, что такое искажение обычно допускают при небольшой горимости, в условиях тяжелой лесопожарной обстановки при большом количестве пожаров подобная фальсификация данных теряет смысл. С использованием численной оценки степени отклонения статистических данных от предсказываемого в рамках закона логнормального распределения авторами сформирован рейтинг регионов с точки зрения достоверности архивных данных о лесных пожарах. Предложенный метод может стать одним из элементов риск-ориентированного подхода для планирования контрольно-надзорных мероприятий в области лесных отношений.

**Ключевые слова:** лесные пожары, лесопожарная обстановка, площадь лесного пожара, эффективность тушения лесных пожаров, статистический анализ, закон логнормального распределения, информационные технологии, риск-ориентированный подход

*Для цитирования:* Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Математическая оценка достоверности информации о лесных пожарах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 21–34. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-21-34>

Original article

## Mathematical Estimation of Information Reliability Regarding Forest Fires

**Roman V. Kotelnikov**<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [B-2453-2018](https://orcid.org/0000-0002-9984-5913),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5913>

**Alexsander A. Martynyuk**, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAB-7622-2020](https://orcid.org/0000-0001-7592-2614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7592-2614>

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow region, 141202, Russian Federation; [kotelnikovrv@firescience.ru](mailto:kotelnikovrv@firescience.ru)<sup>✉</sup>, [vniilm\\_martinuk@mail.ru](mailto:vniilm_martinuk@mail.ru)

Received on April 03, 2021 / Approved after reviewing on June 28, 2021 / Accepted on June 30, 2021

**Abstract.** The rapid development of digital technologies, especially methods for processing a large amount of information, offers vast opportunities for obtaining new algorithms for supporting management decisions, including the prevention of forest fires. Therefore, the requirements for data accuracy on fire hazards in forests and forest fires considerably increase. Even though the remote sensing of the Earth from space is a potential method for acquiring information independent of the human factor, it still has several technical limitations that hinder total automation. Therefore, it is important to provide a comprehensive control over the information coming from the forest fire departments. Besides, the long-term fire risk prognoses must consider retrospective statistics and cyclical weather conditions. This requires the creation of methods for evaluating the reliability of the initial data. An analysis of the records on the number of forest fires that happened in the Russian Federation from 1969 to 2020 revealed that the distribution principle of the values in a large sampling set is close to lognormal, which is the author's fundamental principle. The few deviations on the right side of the distribution indirectly support the hypothesis that, in the provided information, the large forest fires in each case were presented as smaller, fragmented events. This is also consistent with the fact that such information usually occurs when the forest fire situation is complex and has many burning locations. An analysis of the records on the forest fires extinguished within one day identified a characteristic deviation, which indirectly supports the assumption that the data was probably distorted to improve recording. In such a situation, the deviation from the pattern corresponds to low combustibility and completely loses its meaning in the conditions of a severe forest fire situation with many burning areas. The authors have formed a ranking of the regions according to the validity of the archival records on the forest fires using the correspondence of the statistical data to the lognormal distribution. The proposed method can become one of the elements of a risk-oriented approach for planning control and supervisory measures in forestry policy.

**Keywords:** forest fires, forest fire conditions, burning of wooded area, forest fire suppression efficiency, statistical analysis, lognormal distribution, information technologies, risk-oriented approach

**For citation:** Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. Mathematical Estimation of Information Reliability Regarding Forest Fires. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 21–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-21-34>



*Введение*

Лесные пожары оказывают существенное влияние на биоразнообразие и экосистемы, здоровье человека [13]. Доля природных пожаров в глобальных выбросах углерода составляет 20 % [9, 20]. Климатические изменения приводят к увеличению количества засушливых дней, что, в свою очередь, повышает пожарную опасность во всем мире [10].

Бурное развитие цифровых технологий и методов обработки больших данных открывает широкие возможности для поиска новых алгоритмов информационной поддержки управленческих решений, в том числе в области охраны лесов от пожаров [4, 5]. С этим связан значительный рост требований к точности данных о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах. Технологии дистанционного зондирования Земли из космоса, являясь перспективным методом получения независимой от человеческого фактора информации, тем не менее имеют ряд технических ограничений и не предоставляют возможности полной автоматизации сбора информации [1, 7, 8, 12, 15]. С этой точки зрения важно обеспечить всесторонний контроль сведений, предоставляемых лесопожарными формированиями. Кроме того, для долгосрочных прогнозов пожарной опасности нужно учитывать цикличность горимости, связанную с лесорастительными особенностями регионов. Для этого необходима разработка методик оценки достоверности ретроспективных данных.

Несмотря на то, что системный подход к охране лесов от пожаров сформировался еще в начале XIX в., официальная информация о лесных пожарах стала централизованно собираться с 1969 г. В частности, в центральную базу авиационной охраны лесов (сейчас ФБУ «Авиалесоохрана», г. Пушкино) поступала информация от учреждений лесного хозяйства, полученная преимущественно авиационными или наземным способами. Подходы к учету лесных пожаров, в том числе состав и структура данных, менялись неоднократно. К сожалению, данные собирались нерегулярно и только с активно охраняемой территории лесов. Кроме того, до развития дистанционных методов мониторинга из космоса контролировать точность оценки площадей лесных пожаров было невозможно.

В последние десятилетия в России для федерального контроля достоверности поступающих от региональных лесопожарных служб сведений о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах в соответствии с законодательством создана многоуровневая система специальных мероприятий. В частности, оперативный контроль осуществляется путем автоматического сравнения региональных данных с данными Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [2, 12], полученными методом детектирования тепловых аномалий. Если расхождения не устранены, проводится детальная проверка крупных лесных пожаров по данным снимков высокого пространственного разрешения. В отдельных спорных случаях может назначаться выездная проверка для натурного замера площади пожаров с использованием приборов спутниковой навигации в процессе облета на воздушном судне или пешего обхода контура пожара.

В то же время большие объемы информации из разных источников, накопленные в лесопожарных базах данных, позволяют проводить статистическую оценку точности сведений о количестве лесных пожаров и эффективности их тушения, что может значительно сократить временные и финансовые затраты на выполнение проверочных мероприятий.

Когда на процессы влияет большое количество сложноконтролируемых факторов, то такие процессы условно можно считать случайными. Даже если часть факторов можно контролировать, далеко не всегда получается формализовать их и численно учесть при исследовании самих процессов. Численные значения параметров (признаков) подобных процессов можно рассматривать как случайные величины. Ключевым параметром случайных величин является их вероятность (т. е. мера того, насколько возможно появление определенного значения этой величины) [6]. Знание закона распределения величины позволяет воспользоваться типовыми формулами расчета всех параметров (дисперсия, математическое ожидание и т. д.), что полезно для задач анализа и прогнозирования [11, 14].

Попытки анализа ретроспективных данных о лесных пожарах с точки зрения оценки формы закона распределения величин в выборке предпринимались давно [3, 16, 18, 19]. Основной сложностью при проведении подобных исследований является ограниченность доступных данных. Вместе с тем даже имеющиеся данные позволяют сделать вывод, что в большинстве случаев распределение сильно отличается от нормального, что связывают прежде всего с активным воздействием на пожары сил пожаротушения. Кроме того, влияние на данные оказывают алгоритмы обработки, что определенным образом искажает картину распределения. В большей степени это сказывается на границе чувствительности алгоритмов.

В рамках исследования анализировалась возможность использования статистических методов для оценки достоверности сведений о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах в регионах и, прежде всего, выявления случаев манипуляций региональных органов лесопользования отчетными данными в целях маскировки объективной лесопожарной обстановки. Речь идет о завышении количества лесных пожаров (дробление площади крупных лесных пожаров на более мелкие) для снижения средней площади одного лесного пожара, а также завышении доли пожаров, потушенных в первые сутки.

#### *Объекты и методы исследования*

Для исследования был выбран массив данных о количестве возникших лесных пожаров и лесных пожаров, ликвидированных в первые сутки, для каждого региона из наиболее часто рассматриваемых при характеристике лесопожарной обстановки и оценке эффективности тушения лесных пожаров. Для удобства географической интерпретации полученных результатов данные были преобразованы с учетом современного административного деления и отнесены к существующим границам субъектов Российской Федерации.

При выборе уровня агрегирования данных (по региону, времени года, месяцу или отдельному дню) учтено, что большая детализация (например, по каждому дню) усредняет все «случайные шумы» в данных, но существенно сокращает объем доступной для исследований выборки. С этой точки зрения за оптимальный уровень детализации приняты сводные данные в разрезе сезонов года (весна, лето, осень). Сформированная таким образом исследовательская выборка составила 4991 наблюдение.

В большой выборке распределение значений показателей, взятых для характеристики лесопожарной обстановки, близко к логнормальному. При этом отклонения от логнормального распределения связаны со значительным количеством случайных и неслучайных факторов. Случайные отклонения, влияющие на близость фактического распределения к расчетному, действуют для всех субъектов Российской Федерации, поэтому при сравнении регионов между собой этими факторами можно пренебречь. К неслучайным, по результатам анализа лесопожарной практики, следует отнести действия региональных органов лесопользования по дроблению площади лесных пожаров и завышению количества пожаров, ликвидированных в первые сутки. Технология установления факта отклонений, вызванных неслучайными факторами, рассмотрена ниже.

Предложено для оценки анализируемых отклонений от базового распределения использовать улучшенный критерий Шапиро–Уилка  $W$ , обладающий максимальной статистической мощностью и адаптированный к большим выборкам – до 2000 наблюдений [17].

Алгоритм решения поставленной задачи предусматривал следующие шаги:

1. Выполнение подгонки основных параметрических распределений к исследуемой выборке для подтверждения близости формы распределения значений к логнормальной. Оценка близости этих распределений к теоретическому распределению по статистике Колмогорова–Смирнова. Повторение расчета отдельно для лет с высокой горимостью и для лет с низкой горимостью, чтобы оценить, насколько устойчив полученный результат. Расчет для этого суммарной пройденной огнем площади за весь год и сортировка годов в порядке возрастания значения. Нахождение 2 искомых крайних случаев посредством деления полученного списка пополам.

2. Расчет критерия Шапиро–Уилка для распределения количества лесных пожаров и пожаров, ликвидированных в первые сутки [17].

3. Расчет уровня статистической значимости для каждого значения критерия.

4. Ранжирование регионов по степени увеличения критерия Шапиро–Уилка, что соответствует приближению распределения к нормальному и, соответственно, повышению достоверности сведений. Выполнение аналогичного ранжирования для общего количества лесных пожаров и пожаров, ликвидированных в первые сутки.

5. Расчет «антирейтинга» регионов по среднему значению рангов.

6. Сортировка регионов по возрастанию итогового антирейтинга.

При построении гистограммы количество градаций для достижения большей наглядности подобрано экспериментально. При выборе учтено требование наличия не менее 20 интервалов и относительно равномерное изменение количества значений в интервалах. Гистограмма построена для преобразованных (прологарифмированных натуральным логарифмом) значений. Соответственно, интервалы выбраны равными в логарифмической разметке.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Для подтверждения формы распределения значений количества лесных пожаров сформированы 3 выборки: все годы (1969–2021); годы с пониженной горимостью (1971, 1973–1975, 1977–1986, 1988–1995, 1997, 1999, 2001, 2004,

2005), годы с повышенной горимостью (остальные). Подгонка распределений и расчет статистики близости Колмогорова–Смирнова  $d$ , а также уровня значимости  $p$  произведены с использованием программного обеспечения Statistica (табл. 1).

Таблица 1

**Оценка близости распределения значений количества возникших лесных пожаров к стандартным параметрическим распределениям**  
**Estimation of statistical confidence intervals for the number of forest fires to the standard distribution conditions**

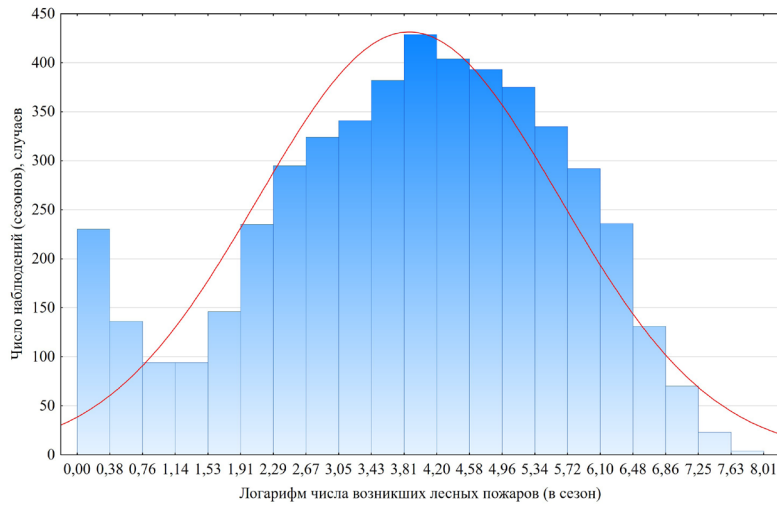
Параметрические распределения	Годы низкой горимости			Годы высокой горимости			Все годы		
	$d$	$p$	Ранг	$d$	$p$	Ранг	$d$	$p$	Ранг
Логнормальное	0,048	0,000132	3	0,043	3,81E–05	1	0,041	7,07E–08	1
Вейбулла	0,031	0,033137	1	0,059	3,50E–09	3	0,043	1,32E–08	2
Обобщенное Парето	0,046	0,000284	2	0,055	5,18E–08	2	0,053	1,01E–12	3
Обобщенное экстремальных значений	0,062	2,14E–07	4	0,066	1,78E–11	4	0,062	2,46E–17	4
Смешанное гауссовское	0,123	1,77E–28	5	0,168	5,75E–71	5	0,151	5,9E–100	5
Джонсона SB	0,134	2,32E–33	6	0,220	1,80E–121	6	0,187	7,7E–152	6
Нормальное	0,246	7,4E–112	7	0,304	1,10E–232	7	0,282	0	7
Полунормальное	0,308	1,1E–175	8	0,431	0	8	0,377	0	8
Релея	0,467	0	9	0,582	0	9	0,531	0	9
Треугольное	0,608	0	10	0,735	0	10	0,721	0	10
Круговое нормальное	–	–	11	–	–	11	–	–	11

Как видно из табл. 1, наиболее близкой формой распределения значений для 2 из 3 выборок является логнормальная форма. При низкой горимости ближе обобщенное распределение Паетто и распределение Вейбулла, но этот результат менее статистически значим и связан, вероятно, не только с существенно меньшим объемом выборки, но и с влиянием человеческого фактора, о котором будет сказано ниже. Учитывая специфику задачи, а также результат, полученный для всего диапазона рассматриваемых лет, за основу было взято логнормальное распределение.

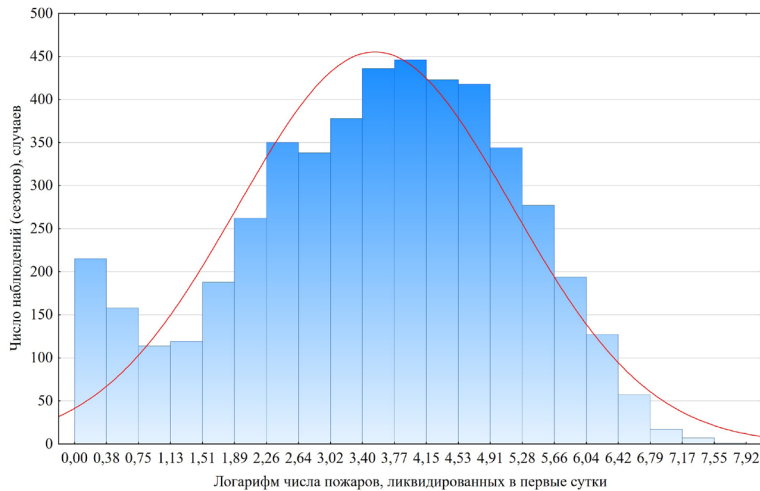
Для удобства визуализации и последующего анализа значения количества возникших лесных пожаров и лесных пожаров, ликвидированных в первые сутки, прологарифмованы. Гистограммы приведены на рис. 1.

Учитывая, что после логарифмирования полученные преобразованные значения распределены по закону, близкому к нормальному, для оценки отклонения можно воспользоваться стандартными критериями (табл. 2).





а



б

Рис. 1. Гистограммы распределения логарифмов значений (1969–2021 гг.): *a* – общего годового количества лесных пожаров; *б* – количества лесных пожаров, потушенных в первые сутки

Fig. 1. The distribution histograms of logarithmic values (1969–2021 years): *a* – total annual number of forest fires; *b* – number of forest fires extinguished during one day

Анализ результата показывает, что отклонение реальной формы распределения значений исследуемой выборки от теоретически ожидаемой параметрической кривой (как было показано выше, для преобразованных логарифмированием значений ожидается нормальное распределение) является статистически значимым ( $p < 0,01$ ), т. е. гипотезу о нормальности можно отвергнуть.

Как видно из рис. 1, фактическое распределение (столбцы) в правой части гистограмм выступает за границу линии, соответствующей теоретическому распределению, что может свидетельствовать о фактах дробления лесных пожаров. Данный вывод объясняется результатами анализа лесопожарной практики, согласно которым при небольшом количестве лесных пожаров (левая часть гистограмм) горимость обычно низкая и ресурсов для тушения хватает.

Таблица 2

**Оценка близости эмпирического распределения (преобразованных значений горимости лесов) к теоретическому нормальному распределению**  
**Estimation of statistical confidence for the empirical distribution (modified values of forest combustibility) to the standard distribution**

Критерий	Значение логарифма	Статистическая значимость
<i>Общее годовое количество лесных пожаров</i>		
Колмогорова–Смирнова	0,041408	$p < 0,01$
Лиллиефорса	–	$p < 0,01$
Шапиро–Уилка	0,980150	$p \approx 0$
<i>Годовое количество лесных пожаров, ликвидированных в первые сутки</i>		
Колмогорова–Смирнова	0,039459	$p < 0,01$
Лиллиефорса	–	$p < 0,01$
Шапиро–Уилка	0,983556	$p \approx 0$

В таких условиях дробить лесные пожары для улучшения отчетности не имеет смысла. Кроме того, возможно сокрытие факта некоторых пожаров (о чем косвенно свидетельствуют аномальные провалы в левой части гистограммы). Если лесопожарная ситуация напряженная и из-за нехватки ресурсов площади пожаров существенно растут, участки крупных пожаров могут быть зарегистрированы в качестве отдельного лесного пожара для существенного снижения контролируемого показателя средней площади лесного пожара. Соответственно, такие явления увеличат число ситуаций (наблюдений) с большим количеством лесных пожаров (смещение в правую часть гистограммы). Причем это будет частично заметно и на гистограмме рис 1, б, характеризующей количество пожаров, ликвидированных в первые сутки.

Искусственное искажение показателя «количество пожаров, ликвидированных в первые сутки», имеет смысл только при малой горимости, когда общее количество пожаров невелико. При сложной лесопожарной обстановке количество лесных пожаров большое, ресурсов на тушение чаще всего не хватает. В таких случаях «закрывать» пожары раньше времени нет необходимости: показатель и так низкий и искусственные корректировки существенно статистику не изменят. Зарегистрированные при «дроблении» новые пожары тоже не оказывают ощутимого влияния на отчетность, так как их количество незначительно. Таким образом, приписки отражаются только на левом краю гистограммы рис. 1, б, что подтверждает аномальность провалов в этой части распределения.

Для дополнительного подтверждения неверности предоставляемых данных можно привести итоговую гистограмму доли лесных пожаров, ликвидированных в первые сутки, на которой аномальная часть соотношения 2 выборок более наглядна (рис. 2). При случайном стечении обстоятельств логично предположить, что распределение процента обнаружения будет относительно равномерным. Вместе с тем фактические данные статистики говорят о неестественно большом числе наблюдений, когда показатель близок к 100 %.



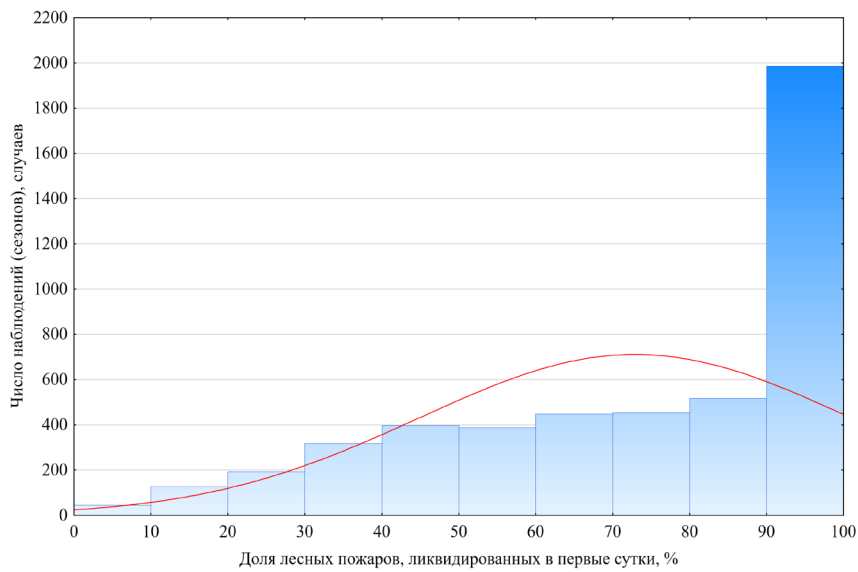


Рис. 2. Распределение доли лесных пожаров, ликвидированных в первые сутки (1969–2021 гг.)

Fig. 2. Proportion distribution of forest fires extinguished within one day (1969–2021 years)

В табл. 3 приведены данные расчета антирейтинга достоверности сведений об общем количестве лесных пожаров и пожаров, ликвидированных в первые сутки. В таблицу включены только те субъекты Российской Федерации, у которых отклонение от логнормального распределения является статистически значимым ( $p < 0,05$ ) и количество значений в анализируемой выборке достаточное ( $n \leq 30$ ). Для части регионов подобное условие выполняется только по одному из контролируемых показателей. В связи с этим данная строчка в расчете рейтинга (в порядке возрастания критерия Шапиро–Уилка) не участвует. Для регионов с отклонением, значимым по обоим показателям, итоговый рейтинг рассчитан как средний показатель. Результирующий список отсортирован по итоговому рейтингу.

Для визуализации результата в качестве примера приведена гистограмма распределения значений количества лесных пожаров для Карачаево-Черкесской Республики – отклонения в правой части гистограммы одни из самых максимальных по сравнению с другими регионами (вероятные сокрытие при очень малом количестве пожаров и искусственное дробление пожаров при увеличении их количества); и для Новосибирской области – отклонения от теоретического логнормального распределения незначительны (рис. 3). Для Карачаево-Черкесской Республики выявлены статистически значимые отклонения от теоретической формы распределения, т. е. предоставленные данные недостоверны. Для Новгородской области статистически значимых отклонений не выявлено, данные можно считать достоверными.

Таблица 3

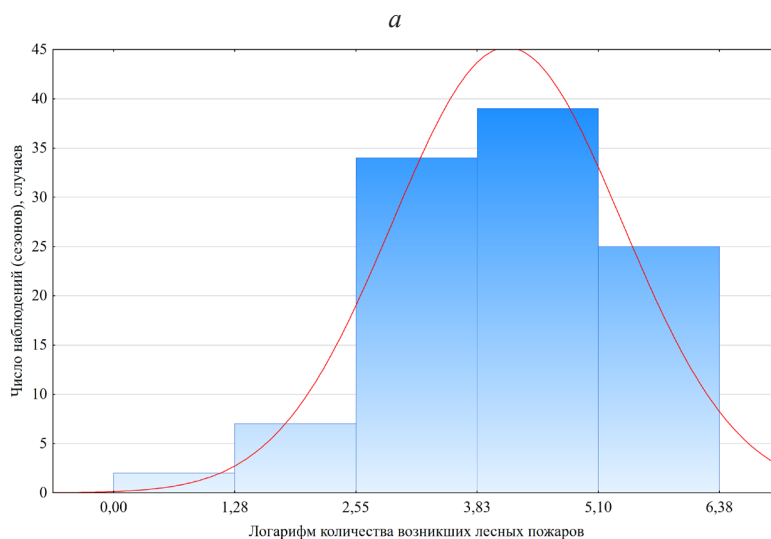
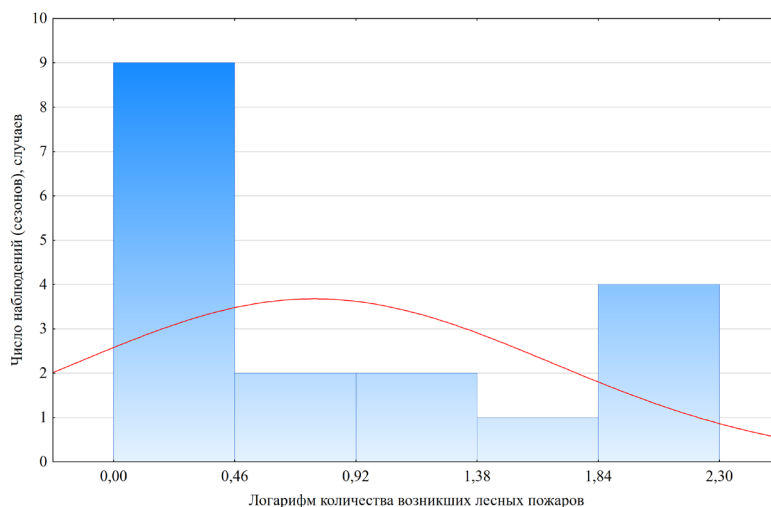
Расчет антирейтинга достоверности сведений об общем количестве лесных пожаров и пожаров, ликвидированных в первые сутки  
 The negative ranking of the regions according to the validity of information about the total number of forest fires and forest fires extinguished within one day

Субъект Российской Федерации	Оценка среднемолодотетней горимости		Лесные пожары				Лесные пожары, ликвидированные в первые сутки				Итоговый антирейтинг
	частота лесных пожаров, случаи / млн га	относительная горимость, га / 100 тыс. га	N	W	p	Антирейтинг	N	W	p	Антирейтинг	
Карачаево-Черкесская Республика	7,0	15,5	18	0,78	0	3	10	0,85	0,05	–	3
Свердловская область	49,3	151,8	112	0,87	0	6	111	0,85	0	1	3,5
Красноярский край	7,2	203,8	110	0,68	0	2	109	0,88	0	6	4
Ставропольский край	26,0	33,2	15	0,89	0,08	–	15	0,88	0,04	4	4
Тюменская область	62,0	229,1	110	0,87	0	7	109	0,87	0	3	5
Хабаровский край	6,1	235,4	127	0,86	0	5	125	0,91	0	8	6,5
Республика Дагестан	8,7	15,1	22	0,89	0,02	12	18	0,86	0,01	2	7
Амурская область	11,2	1146,6	114	0,85	0	4	110	0,92	0	11	7,5
Иркутская область	18,4	427,8	111	0,67	0	1	106	0,93	0	14	7,5
Московская область	47,6	6,2	22	0,88	0,01	11	22	0,88	0,01	5	8
Смоленская область	10,5	4,1	23	0,87	0,01	9	22	0,89	0,02	7	8
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	20,5	156,4	30	0,95	0,14	–	30	0,91	0,02	9	9
Забайкальский край	63,9	1895	112	0,88	0	10	111	0,91	0	10	10
Республика Коми	7,6	45,7	110	0,90	0	13	106	0,98	0,23	–	13
Республика Саха (Якутия)	2,2	547,9	107	0,87	0	8	107	0,94	0	18	13
Курганская область	286,6	593,5	110	0,91	0	14	108	0,93	0	15	14,5

Окончание табл. 3

Субъект Российской Федерации	Оценка среднемолодоголетней горимости		Лесные пожары				Лесные пожары, ликвидированные в первые сутки				Итоговый антирейтинг
	частота лесных пожаров, случаи / млн га	относительная горимость, га / 100 тыс. га	N	W	P	Антирейтинг	N	W	P	Антирейтинг	
Ленинградская область	31,7	3,1	90	0,93	0	17	88	0,98	0,35	–	17
Республика Хакасия	27,4	115,1	69	0,94	0	21	65	0,92	0	13	17
Псковская область	37,9	7,1	72	0,93	0	19	72	0,93	0	16	17,5
Алтайский край	92,7	112,1	109	0,93	0	18	107	0,98	0,11	–	18
Республика Карелия	22,5	25,0	105	0,94	0	24	105	0,92	0	12	18
Приморский край	27,2	237,2	140	0,92	0	15	134	0,96	0	23	19
Челябинская область	353,4	347,2	106	0,93	0	20	105	0,94	0	19	19,5
Краснодарский край	22,4	22,4	43	0,94	0,03	23	42	0,94	0,02	17	20
Пермский край	20,5	16,0	105	0,93	0	16	103	0,96	0	25	20,5
Сахалинская область	5,6	37,5	66	0,98	0,30	–	64	0,95	0,02	22	22
Еврейская автономная область	53,1	1866,7	87	0,95	0	25	86	0,95	0	21	23
Кемеровская область – Кузбасс	44,8	20,4	103	0,95	0	27	101	0,95	0	20	23,5
Омская область	61,9	209,5	103	0,95	0	28	100	0,96	0	26	27
Томская область	146,2	186,4	106	0,99	0,78	–	106	0,96	0	27	27
Республика Бурятия	32,1	465,8	107	0,94	0	22	106	0,97	0,04	33	27,5
Кировская область	17,2	10,5	103	0,97	0,01	32	103	0,96	0	24	28
Республика Тыва	15,3	281,8	107	0,95	0	26	105	0,97	0,04	32	29
Костромская область	12,0	4,8	90	0,97	0,02	31	89	0,97	0,03	28	29,5
Удмуртская Республика	27,1	1,2	88	0,97	0,02	30	87	0,97	0,03	29	29,5
Республика Башкортостан	27,7	40,3	102	0,98	0,14	–	100	0,97	0,03	31	31
Магаданская область	2,0	191,8	106	0,97	0,03	33	106	0,97	0,02	30	31,5
Новосибирская область	49,1	78,7	107	0,96	0	29	106	0,98	0,05	34	31,5

Примечание: N – количество сезонов года (число отчетов), включенных в выборку.



*б*

Рис. 3. Гистограммы распределения логарифма количества лесных пожаров: *a* – по Карачаево-Черкесской Республике (2008–2021 гг.); *б* – по Новосибирской области (1969–2021 гг.)

Fig. 3. The distribution histograms of logarithmic values of the number of forest fires: *a* – in the Karachay-Cherkess Republic (2008–2021 years); *б* – in the Novosibirsk region (1969–2021 years)

### Заключение

Исследования подтверждают логнормальный характер распределения значений количества лесных пожаров в больших выборках. Численная оценка степени отклонения статистических данных от предсказываемого в рамках закона логнормального распределения позволила сформировать рейтинг регионов с точки зрения достоверности архивных данных о лесных пожарах. Предложенный метод в рамках риск-ориентированного подхода может помочь при планировании контрольно-надзорных мероприятий в области лесных отношений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 9–26.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Integrated Burnt Area Assessment Based on Combine Use of Multi-Resolution Modis and Landsat-TM/ETM+ Satellite Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2012, no. 2, pp. 9–26. (In Russ.).

2. Ковалев Н.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Бурцев М.А., Ершов Д.В., Кривошеев Н.П., Мазуров А.А. ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 7. С. 283–291.

Kovalev N.A., Lupyan E.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Burtsev M.A., Ershov D.V., Krivosheev N.P., Mazurov A.A. ISDM-Rosleskhoz: 15 Years of Operation and Evolution. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2020, no. 7, pp. 283–291. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-283-291>

3. Коморовский В.С. Модели организации и управления при борьбе с лесными пожарами: моногр. М.: Инфра-М, 2012. 120 с.

Komorovskiy V.S. *Models of Organization and Management in Fighting Forest Fires: Monograph*. Moscow, Infra-M Publ., 2012. 120 p. (In Russ.).

4. Котельников Р.В., Коршунов Н.А., Гиряев Н.М. Задачи принятия решений в области охраны лесов от пожаров. Основные приоритеты развития информационного обеспечения // Сиб. лесн. журн. 2017. № 5. С. 18–24.

Kotelnikov R.V., Korshunov N.A., Giryayev N.A. Objectives of Decision Making in Protecting Forests from Fires. Main Priorities on Development of Informational Support. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal Forest Science, 2017, no. 5, pp. 18–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170502>

5. Котельников Р.В., Мартынюк А.А. Использование закона Бенфорда для оценки достоверности сведений о лесных пожарах // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 28–34.

Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. Application of the Benford Law in Assessment of Wildfire Data Accuracy. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, vol. 8, no. 1 (29), pp. 28–34. (In Russ.). [https://doi.org/10.12737/article\\_5ab0dfbb946859.24647128](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbb946859.24647128)

6. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: моногр. Новосибирск: НГТУ, 2011. 888 с.

Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Postovalov S.N., Chimitova E.V. *Statistical Data Analysis, Simulation and Study of Probability Regularities. Computer Approach: Monograph*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 888 p. (In Russ.).

7. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценок Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 158–175.

Loupiyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Senko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G. Satellite Monitoring of Forest Fires in the 21st Century on the Territory of the Russian Federation (Facts and Figures Based on Active Fire Detection). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 158–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>

8. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91.

Ponomarev E.I., Shvetsov E.G. Satellite Detection of Forest Fires and Geoinformation Methods for Calibrating Results. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa* = Earth Observation and Remote Sensing, 2015, no. 1, pp. 84–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0205961415010054>

9. Giglio L., Randerson J.T., Werf G.R. Analysis of Daily, Monthly, and Annual Burned Area Using the Fourth-Generation Global Fire Emissions Database (GFED4): Analysis of Burned Area. *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences series*, 2013, vol. 118, no. 1, pp. 317–328. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>

10. Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M.J.S. Climate-Induced Variations in Global Wildfire Danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, no. 7537, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>

11. Katz R.W., Brush G.S., Parlange M.B. Statistics of Extremes: Modeling Ecological Disturbances. *Ecology*, 2005, vol. 86, no. 5, pp. 1124–1134. <https://doi.org/10.1890/04-0606>

12. Kotelnikov R.V., Lupyan E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V. Space Monitoring of Forest Fires: History of the Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz. *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, vol. 13, no. 7, pp. 795–802. <https://doi.org/10.1134/S1995425520070045>

13. Langmann B., Duncan B., Textor C., Trentmann J., Werf G. Vegetation Fire Emissions and Their Impact on Air Pollution and Climate. *Atmospheric Environment*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.047>

14. Limpert E., Stahel W.A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across the Sciences: Keys and Clues. *Bioscience*, 2001, vol. 51, no. 5, p. 341. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0341:lnstats\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0341:lnstats]2.0.co;2)

15. Loboda T.V., Csiszar I.A. Estimating Burned Area from AVHRR and MODIS: Validation Results and Sources of Error. *Contemporary Earth Remote Sensing from Space*, 2005, vol. 2, pp. 415–421.

16. Pereira Jr. A.C., Oliveira S.L.J., Pereira J.M.C., Turkman M.A.A. Modelling Fire Frequency in a Cerrado Savanna Protected Area. *PloS One*, 2014, vol. 9, no. 7, art. no. e102380. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102380>

17. Royston J.P. An Extension of Shapiro and Wilk's W. Test for Normality to Large Samples. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C: Applied Statistics*, 1982, vol. 31, no. 2, pp. 115–124. <https://doi.org/10.2307/2347973>

18. Taylor S.W., Woolford D.G., Dean C.B., Martell D.L. Wildfire Prediction to Inform Fire Management: Statistical Science Challenges. *Journal of the Institute of Mathematical Statistics*, 2013, vol. 28, no. 4, pp. 586–615. <https://doi.org/10.1214/13-sts451>

19. Torres-Rojo J.M. Index for the Estimation of the Occurrence of Forest Fires in Large Areas. *Revista Chapingo, Serie: Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 433–449. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.082>

20. Werf G.R., Dempewolf J., Trigg S.N., Randerson J.T., Kasibhatla P.S., Giglio L., Murdiyarto D., Peters W., Morton D.C., Collatz G.J., Dolman A.J., DeFries R.S. Climate Regulation of Fire Emissions and Deforestation in Equatorial Asia. *PNAS*, 2008, vol. 105, no. 51, pp. 20350–20355. <https://doi.org/10.1073/pnas.0803375105>

**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\*161:581.192.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47

### Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии

**В.В. Стасова\***, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [AAAG-8220-2021](https://orcid.org/0000-0001-9325-6715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9325-6715>

**Л.Н. Скрипальщикова**, канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотр.;

Researcher ID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

**Н.В. Астраханцева**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [P-7560-2017](https://orcid.org/0000-0001-6014-2148),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6014-2148>

**А.П. Барченков**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, Россия, 660036; [vistasova@mail.ru](mailto:vistasova@mail.ru), [lara@ksc.krasn.ru](mailto:lara@ksc.krasn.ru), [astr\\_nat@mail.ru](mailto:astr_nat@mail.ru), [alexbarchenkov@mail.ru](mailto:alexbarchenkov@mail.ru)

Поступила в редакцию 29.03.21 / Одобрена после рецензирования 03.07.21 / Принята к печати 05.07.21

**Аннотация.** Изучено содержание фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях техногенных нагрузок и в фоновых условиях. Исследования проводили в березняках разнотравного типа леса в пригородной зоне г. Красноярска. Древостои, испытывающие техногенные нагрузки, расположены к востоку от города по направлению основного переноса воздушных масс, фоновые – в северном и западном направлениях от города, техногенная нагрузка на эти древостои минимальна. Содержание фотосинтетических пигментов определяли в этанольных экстрактах, расчет проводили на 1 г абсолютно сухой массы листьев. Аккумуляцию пыли листовой поверхностью оценивали по методике Ж. Детри (1973). В промытых листьях определяли содержание ионов цинка, свинца, алюминия и фтора. Показано, что содержание хлорофилла *a* в листьях берез из условно чистых мест произрастания несколько ниже, чем в листьях из древоствоев, подвергающихся техногенным нагрузкам. Содержание хлорофилла *b* в листьях берез из разных мест произрастания оказалось в 2,5–3 раза ниже, чем хлорофилла *a*, и сопоставимо с содержанием каротиноидов. Общее содержание хлорофиллов колебалось от 5,4 до 7,3 мг/г абсолютно сухой массы, соотношение форм хлорофиллов – от 2,5 до 3, отношение суммы содержания хлорофиллов к суммарному содержанию каротиноидов – от 3,4 до 3,8. При увеличении пылевой нагрузки росло содержание всех фотосинтетических пигментов. Накопление ионов цинка в клетках листа березы отрицательно сказывалось на содержании пигментов, особенно хлорофилла *a*, но с соотношением пигментов не коррелировало. Значимой корреляции содержания свинца и фотосинтетических пигментов не установлено. При увеличении концентрации алюминия в листьях количество хлорофиллов и каротиноидов достоверно возрастало, связи уровня алюминия с соотношением пигментов не обнаружено. Между содержанием фтора в листовой массе и количеством разных форм хлорофилла достоверных корреляций не найдено. Полученные результаты свидетельствуют об адаптивной реакции фотосинтетического аппарата на присутствие поллютантов в концентрациях ниже пороговых значений.

**Ключевые слова:** пригородные леса, техногенное влияние, береза повислая, пигменты листьев, хлорофиллы, каротиноиды, техногенная пыль, цинк, свинец, алюминий, фтор, Красноярск



**Благодарности:** Работа выполнена в рамках базовых проектов фундаментальных исследований Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН «Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата», № 0287-2021-0008 и «Снижение рисков возрастающего воздействия болезней и вредителей на лесные экосистемы в условиях глобальных изменений окружающей среды», № 0287-2021-0011.

**Для цитирования:** Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П. Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 35–47. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-35-47>

Original article

### Photosynthetic Pigments in Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) with Technogenic Load

**Victoria V. Stasova**<sup>✉</sup>, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [AAG-8220-2021](https://orcid.org/0000-0001-9325-6715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9325-6715>

**Larisa N. Skripal'shchikova**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist, Assoc.Prof.;

Researcher ID: [AAF-7714-2019](https://orcid.org/0000-0003-2294-497X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2294-497X>

**Natalya V. Astrakhantseva**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [P-7560-2017](https://orcid.org/0000-0001-6014-2148), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6014-2148>

**Alexey P. Barchenkov**, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [AAH-5825-2021](https://orcid.org/0000-0003-3964-480X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-480X>

V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; [vistasova@mail.ru](mailto:vistasova@mail.ru)<sup>✉</sup>, [lara@ksc.krasn.ru](mailto:lara@ksc.krasn.ru), [astr\\_nat@mail.ru](mailto:astr_nat@mail.ru), [alexbarchenkov@mail.ru](mailto:alexbarchenkov@mail.ru)

Received on March 29, 2021 / Approved after reviewing on July 03, 2021 / Accepted on July 05, 2021

**Abstract.** The content of photosynthetic pigments in silver birch leaves (*Betula pendula* Roth.) is studied in areas with technogenic load and in baseline conditions. The research is performed in a forb type of birch forest in the suburbs of Krasnoyarsk. The wood stands exposed to a high level of technogenic pressure are located to the east of the city in the prevailing direction of air mass movement. The reference stands are under the least technogenic pollution and grow in western and northern areas of the city. The photosynthetic pigments are determined in ethanol extracts, calculated per 1 g of absolute dry mass (a.d.m.) of the leaves. A level of dust deposition on leaf surfaces is evaluated according to the method of J. Detrie (1973). The amounts of zinc, lead, aluminum, and fluorine ions are estimated in the washed leaves. It is found that the content of chlorophyll *a* inside the birch leaves from a relatively clean environment is slightly lower compared to the concentration in the leaves with the technogenic load. The chlorophyll *b* concentration is 2.5–3 times less than chlorophyll *a* and is close to the amount of carotenoids. The total chlorophyll content in birch leaves from different locations ranges from 5.4 to 7.3 mg/g a.d.m., the ratio of chlorophyll forms varies from 2.5 to 3, the proportion of net chlorophyll to carotenoids is between 3.4 and 3.8. As the level of dust increases, the content of the total photosynthetic pigments also rises.





The accumulation of zinc ions in the birch leaf cells has a negative effect on pigment content, especially chlorophyll *a*, but doesn't correlate with the ratio of the pigments. There has not been any correlation found between the lead and the photosynthetic pigments. It is noted that the rise in the concentration of aluminum significantly affects the contents of the chlorophylls and the carotenoids, while no relationship has been discovered between the concentration of aluminum and the proportion of the pigments. The relationship between fluorine and different forms of chlorophyll is absent as well. The results indicate the adaptive response of the photosynthetic system to the presence of pollutants in concentrations below the threshold values that are indicated in the literature.

**Keywords:** suburban forests, technogenic impact, *Betula pendula* Roth., leaf pigments, chlorophylls, carotenoids, technogenic dust, zinc, lead, aluminum, fluorine, Krasnoyarsk

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the basic research projects of V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS "Natural and Anthropogenic Dynamics of Middle Siberia Taiga Forests in Changing Climate", № 0287-2021-0008, and "Reducing the Risks of the Increasing Impact of Diseases and Pests on Forest Ecosystems in the Context of Global Environmental Changes", № 0287-2021-0011.

**For citation:** Stasova V.V., Skripal'shchikova L.N., Astrakhantseva N.V., Barchenkov A.P. Photosynthetic Pigments in Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) with Technogenic Load. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 35–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-35-47>

### Введение

Содержание фотосинтетических пигментов часто используют в качестве индикатора воздействия загрязняющих веществ. Хроническое воздействие даже небольших доз двуокиси серы, оксидов азота и соединений фтора может приводить к потере хлорофилла и снижению фотосинтеза [12]. Принципиальная возможность использования содержания фотосинтетических пигментов для целей индикации суммарного загрязнения окружающей среды показана О.А. Неверовой [16].

Внешним проявлением изменения концентрации фотосинтетических пигментов является изменение окраски листьев (общая дехромация, локальные хлорозы). Показатель дехромации древесных пород варьирует в широком диапазоне – от 10 до 60 %, наиболее подвержены дехромации хвойные породы, из лиственных – тополь [25].

Количественное определение содержания пигментов в листьях растений, произрастающих в городской среде, и особенно вблизи крупных промышленных предприятий, показало, что усиление техногенной нагрузки сопровождается снижением концентрации хлорофиллов и каротиноидов [15, 24, 26]. Следствием этого является уменьшение фотосинтетической способности ассимиляционного аппарата. Максимальное снижение фотосинтетической способности отмечалось у сирени и липы, минимальное – у сосны и ели. Выявлено, что у лиственных пород по сравнению с хвойными фотосинтетическая способность падает в большей степени, что, вероятно, связано с большей потенциальной интенсивностью газообмена у первых [15].

Соотношение содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов также не остается постоянным. Изменения в соотношении пигментов зависят от интенсивности техногенной нагрузки, химического состава поллютантов и видовой принадлежности растения [11, 19]. У устойчивых видов при низкой концентрации сернистого газа наблюдалось повышение содержания пигментов [18]. Изменение соотношения пигментов свидетельствует о преимущественном разрушении одного из них или активации синтеза других. Для березы повислой отмечался более стабильный уровень хлорофилла *a* при большей изменчивости содержания хлорофилла *b* и каротиноидов [8]. Авторы считают, что поддержание стабильного уровня концентрации хлорофилла *a*, представленного как в реакционных центрах, так и в антенном комплексе, является показателем поддержания физиологической нормы, необходимой для оптимизации протекания фотосинтеза. Содержание хлорофилла *b* и каротиноидов обычно более изменчиво, так как первый, синтезируясь в дополнительном количестве, компенсирует недостаточное освещение (поступление световых квантов ниже уровня насыщения), а вторые, помимо участия в фотосинтезе, выполняют роль важнейших компонентов антиоксидантной системы. Они выступают в качестве эффективной защиты от свободных радикалов, которые образуются в результате метаболических реакций не только в листьях, но и в других органах растений [8].

Тяжелые металлы являются одними из наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды в условиях городских территорий. В придорожных посадках содержание суммы хлорофиллов в листьях березы повислой (г. Кемерово) снижалось на 8–34 % по сравнению с контролем, а также отмечалось большее уменьшение содержания хлорофилла *b* по сравнению с хлорофиллом *a* [24]. Исследования содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой и тополя бальзамического в районах г. Красноярска с разным уровнем загрязнения показали уменьшение среднего содержания хлорофилла *a* – на 8–13 %, хлорофилла *b* – на 20–38 %, суммы хлорофиллов – на 13–19 %, суммы каротиноидов – на 2–7 % [10].

Цель работы – оценка содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы под воздействием техногенных нагрузок и в фоновых условиях, а также влияния некоторых компонентов загрязнения на состав и концентрацию пигментов.

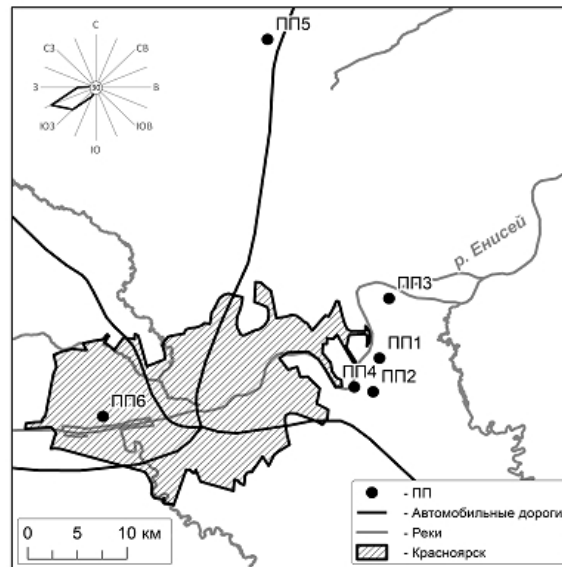
#### *Объекты и методы исследования*

Исследования проводили в 2016 г. в березняках разнотравного типа на мониторинговых пробных площадях (ПП), заложенных в пригородной зоне г. Красноярска и подвергающихся антропогенным нагрузкам различной интенсивности [20]. ПП 1–4 расположены к востоку от города по направлению основного переноса воздушных масс, содержащих выбросы промышленных предприятий и автотранспорта (буферная зона). Выбранные для сравнения ПП 5 и 6 расположены соответственно в северном и западном направлении от города, техногенная нагрузка на них минимальна, и они рассматривались как фоновые (рис. 1). Средний возраст древостоев 50–80 лет [20].

На каждой ПП в начале августа отобрали по 5 модельных деревьев, средних по высоте и диаметру. Листья отбирали по периметру нижней части кроны каждого модельного дерева, из них методом «конверта» получали среднюю пробу 20 листьев.

Рис. 1. Схема расположения исследуемых березовых насаждений: ПП 1 – злаково-разнотравный березняк; ПП 2 и 3 – разнотравно-злаковые березняки; ПП 4 – разнотравно-осочковый березняк; ПП 5 и 6 – разнотравные березняки

Fig. 1. Location of the studied birch stands. Buffer zone: ПП 1 – graminous-forb; ПП 2 – graminous-forb; ПП 3 – graminous-forb; ПП 4 – sedge-forb. Reference: ПП 5 – forb; ПП 6 – forb



Содержание фотосинтетических пигментов устанавливали в этанольных экстрактах по общепринятой методике [31, 32], расчет проводили на 1 г абсолютно сухой массы (а.с.м.) листьев. Остальные листья, собранные с модельного дерева, использовали для определения аккумуляции пыли листовой поверхностью [6]. Для этого каждый образец листьев взвешивали и промывали в 1 л дистиллированной воды. Смывы фильтровали через абсолютно сухой фильтр. Количество пыли на листовой массе находили по разнице между заполненным и абсолютно сухим фильтром и пересчитывали на 1 кг а.с.м. листьев [6]. Для химического анализа промытые листья высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С. Содержание тяжелых металлов, алюминия и валового фтора в листьях определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Красноярский».

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Содержание цинка, свинца, алюминия и фтора, выявленное в листьях березы в пригородах Красноярска, сравнили со значениями, указанными для растений как нормальные и токсичные [7]. Не отмечено повышения концентраций изученных элементов до значений, вызывающих повреждения растений (табл. 1).

Основную часть фотосинтетических пигментов листьев березы составляет хлорофилл *a*. В листьях берез из условно чистых мест произрастания (ПП 5 и 6) его содержание несколько ниже, чем в листьях из древостоев, подвергающихся техногенным нагрузкам (рис. 2). Содержание хлорофилла *b* в листьях березы из разных мест произрастания составляет от 1,3 до 1,8 мг/г а.с.м., что в 2,5–3 раза ниже, чем хлорофилла *a*, и сопоставимо с содержанием каротиноидов. Общее количество хлорофиллов колеблется от 5,4 до 7,3 мг/г а.с.м. листьев, соотношение форм хлорофиллов – от 2,5 до 3,0, отношение суммы содержания хлорофиллов к суммарному содержанию каротиноидов – от 3,4 до 3,8 и не позволяет выявить связи показателя с особенностями условий произрастания исследуемых березовых древостоев (рис. 3).

Таблица 1

**Аккумуляция пыли на поверхности листьев и содержание элементов  
(мг/кг а.с.м.) в листовой массе березы повислой**  
**Dust deposition on leaf surfaces and content of chemical elements  
(mg/kg a.d.m.) in leaf mass of silver birch**

№ ПП / концентрация элементов в растениях [7]	Пыль	Zn	Pb	Al	F
1	5,04±1,24	69,0±14,0	4,60±1,20	42,0±11,0	13,86±1,48
2	7,94±1,74	92,0±18,0	9,10±2,30	93,0±24,0	13,12±1,30
3	3,11±0,41	34,7±6,9	0,95±0,24	145,0±38,0	13,68±1,52
4	5,08±0,66	86,0±17,0	1,95±0,49	37,1±9,6	13,90±1,46
5	2,03±0,65	93,0±19,0	0,11±0,03	11,8±3,1	7,64±0,86
6	1,28±0,24	85,0±19,0	0,29±0,07	36,8±9,6	10,96±1,32
Нормальная	–	27–150	5–10	–	5–30
Токсичная	–	100–400	30–100	200	50–500

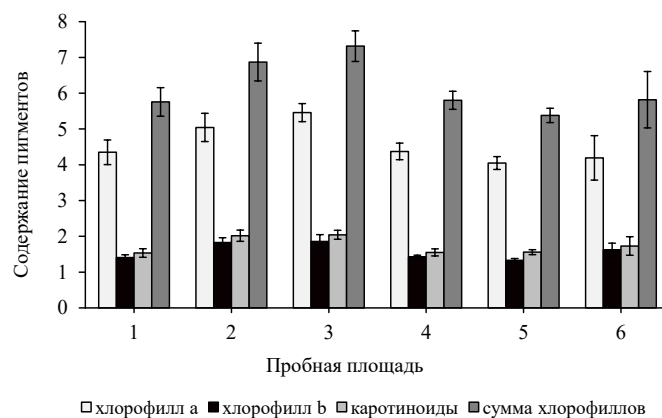


Рис. 2. Содержание хлорофиллов *a*, *b*, суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях берез из разных мест произрастания, мг/г а.с.м.

Fig. 2. Chlorophylls *a*, *b*, total amount of chlorophylls and carotenoids in birch leaves from different stands, mg/g a.d.m.

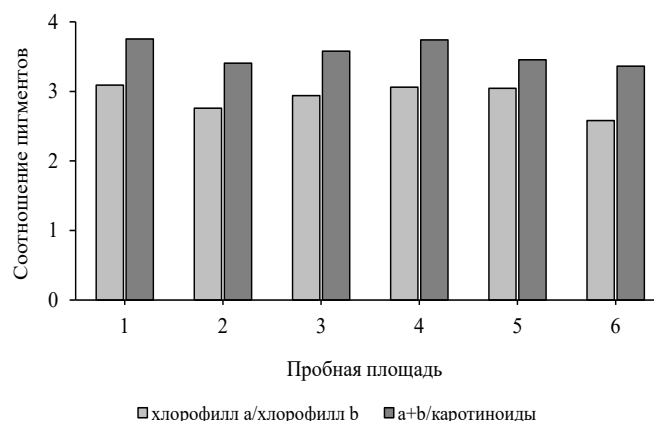


Рис. 3. Соотношение содержаний хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* и суммы хлорофиллов к сумме каротиноидов в листьях берез из разных мест произрастания

Fig. 3. Ratios of chlorophyll *a* to chlorophyll *b* and chlorophylls sum to carotenoids sum in birch leaves from different stands

Хлорофиллы и каротиноиды принимают непосредственное участие в процессе фотосинтеза. Хлорофилл *a* в основном локализован в фотосистемах I и II мембран хлоропластов, где осуществляются фотохимические реакции преобразования энергии света в энергию химических связей. Часть хлорофилла *a*,

хлорофилл *b* и каротиноиды входят в состав светособирающих комплексов, поглощающих и передающих энергию в фотосистемы. Поэтому содержание пигментов может выступать в качестве показателя взаимосвязи растения со средой и характеристикой его фотосинтетической продуктивности [1, 4]. Пигментный аппарат растений приспосабливается к условиям среды, при этом изменяется как общее содержание пигментов, так и их соотношение. Небольшое повышение количества зеленых пигментов было отмечено у устойчивых листовых пород в условиях низкого и среднего уровня загрязнения, а в условиях сильного загрязнения происходили снижение содержания пигментов и подавление фотосинтетической активности [13–15, 18, 19].

Изменения в соотношении пигментов зависят от интенсивности техногенной нагрузки, химического состава поллютантов и видовой принадлежности растения [11, 19]. В городских условиях в листьях древесных пород содержание фотосинтетических пигментов увеличивалось в зонах с умеренной техногенной нагрузкой и снижалось при повышении уровня загрязнения (примагистральные посадки) [2]. В опытах с фумигацией смесью SO<sub>2</sub> и HF, характерной для выбросов алюминиевых заводов, у устойчивых лесных древесных видов отношение хлорофиллов *a/b* имело более высокое значение, чем у неустойчивых [17]. Изменение соотношения пигментов свидетельствует о преимущественном разрушении одного из них или активации синтеза других. При этом многие авторы считают более стабильным содержание хлорофилла *a* как основного пигмента, участвующего как в реакционных центрах, так и в светособирающем комплексе [8, 10, 19]. Соотношения пигментов изменяются в зависимости от сезона [26]. Так, в листьях березы максимальное содержание хлорофилла *a* отмечено в июле в зоне загрязнения атмосферы выбросами нефтехимических производств Уфимского промышленного центра, минимальное – в мае и августе. В относительно чистом районе максимум хлорофилла *a* зафиксирован в мае, минимум – в августе. Для хлорофилла *b* максимум установлен в июле–августе в условиях загрязнения и в мае – в чистом районе. Содержание каротиноидов в листьях березы в условиях загрязнения выше в июне и июле, ниже контрольных значений – в мае, в августе содержание каротиноидов в условиях загрязнения и в контроле практически одинаково [26].

Нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между содержанием фотосинтетических пигментов в листьях березы из разных мест произрастания, количеством пыли, накопившейся на листьях модельных деревьев, и уровнем некоторых элементов в листовой массе (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между содержанием фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой, пылевой нагрузкой и количеством элементов в листовой массе**  
**Correlation coefficients between photosynthetic pigments, dust deposition and chemical elements of silver birch leaves**

Нагрузка	Хлорофилл			Каротиноиды	<i>a/b</i>	<i>a+b</i> / каротиноиды
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>			
Пыль	0,734	0,660	0,732	0,654	–0,091	0,065
Zn	–0,682	–0,462	–0,634	–0,444	–0,179	–0,336
Pb	0,361	0,362	0,371	0,362	–0,095	–0,011
Al	0,989	0,890	0,986	0,895	–0,162	–0,032
F	0,533	0,104	0,419	0,142	0,702	0,715

По результатам расчета парных корреляций можно заключить, что содержание фотосинтетических пигментов связано с количеством пыли, накапливающейся на листьях, заметной положительной связью. В условиях повышенной пылевой нагрузки увеличивается содержание всех фотосинтетических пигментов, причем на их соотношение пыль влияния не оказывает. Отложение пыли на поверхности листьев уменьшает количество света, проникающего в клетки, создавая эффект некоторого затенения листьев. Можно предположить, что увеличение содержания пигментов является приспособительной реакцией на уменьшение светового потока. Теневые листья, в отличие от световых, содержат большее количество пигментов [21, 31].

В составе техногенной пыли присутствуют вещества и ионы, в том числе тяжелых металлов, которые могут проникать в листья через устьица или даже через кутикулу [3, 22]. При исследовании листовых пород было показано, что наибольшей аккумулярующей способностью в отношении тяжелых металлов обладают листья березы, наименьшей – листья липы. Для листьев березы характерно повышенное поглощение наиболее токсичных тяжелых металлов – кадмия, свинца и никеля, а также марганца [3].

Содержание цинка в листьях березы на разных ПП колеблется от 34,7 до 93 мг/кг а.с.м. Концентрация ионов цинка в растениях 100–400 мг/кг считается токсичной [7]. Таким образом, содержание цинка в листовой массе березы в пригородах Красноярска не достигает уровня, при котором проявляются его токсические свойства. Тем не менее накопление ионов цинка в клетках листа березы отрицательно коррелирует с содержанием пигментов, особенно хлорофилла *a* (табл. 2). Соотношение пигментов, как показали расчеты, не связано с содержанием цинка. Цинк необходим для растений и выполняет важные функции в метаболизме, входя в состав разнообразных ферментов, таких как дегидрогеназы, протеиназы, пептидазы и фосфогидролазы [29]. Рядом авторов показано, что основные функции цинка в растениях связаны с метаболизмом углеводов, протеинов и фосфата, а также с образованием ауксина, ДНК и рибосом [28]. Есть свидетельства того, что цинк влияет на проницаемость мембран и стабилизирует клеточные компоненты и системы у микроорганизмов. Полагают, что цинк повышает устойчивость растений к сухим и жарким погодным условиям, а также к бактериальным и грибковым заболеваниям [7]. Избыток цинка оказывает негативное действие на растения [35]. В частности, он вызывает уменьшение содержания в листьях основных фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), снижение потенциальной квантовой эффективности фотосистемы II [9].

Выявленное содержание свинца в листьях березы в фоновых условиях очень низкое – 0,11–0,28 мг/кг а.с.м. листьев – и достигает 9,1 мг/кг на ПП 2. Нормальное содержание этого элемента в растениях колеблется от 5 до 10 мг/кг сухой массы [7], т. е. в пригородных лесах Красноярска концентрация свинца находится в пределах нормы. Расчеты не показали заметной корреляции содержания свинца и фотосинтетических пигментов (табл. 2). Свинец – токсичный тяжелый металл, не относится к элементам, необходимым для растений [7, 37]. Ионы свинца подавляют рост растений, нарушают поглощение минеральных элементов и водный баланс, изменяют гормональный статус и воздействуют на структуру и проницаемость мембран. Под влиянием свинца



снижается интенсивность фотосинтеза, уменьшается содержание хлорофиллов и каротиноидов вследствие ингибирования ряда ферментов их биосинтеза [33]. К основным источникам загрязнения свинцом относятся техногенная пыль и выхлопные газы автотранспорта. Береза по сравнению с другими лиственными породами (тополь, рябина, липа) аккумулирует в листьях наибольшее количество свинца [3].

Содержание алюминия в листьях березы колеблется от 11,8 (ПП 5) до 145 мг/кг а.с.м. (ПП 3). Токсичная концентрация алюминия у растений составляет свыше 200 мг/кг [7]. Расчеты парной корреляции содержания алюминия и фотосинтетических пигментов показали, что при увеличении концентрации алюминия в листьях содержание хлорофиллов и каротиноидов достоверно возрастает, при этом не выявлено корреляции с соотношением пигментов (табл. 2). Алюминий не является тяжелым металлом и очень распространен в земной коре. Его физиологические функции в растении неясны. В обзорах, посвященных влиянию ионов  $Al^{3+}$ , указывается, что избыток этого элемента нарушает деление клеток, воздействуя на цитоскелет [38]. Наиболее токсичное действие алюминий оказывает на корни [38], но также влияет и на надземные органы, вызывая изменения в клетках листьев, уменьшение апертуры устьиц и интенсивности фотосинтеза из-за снижения содержания фотосинтетических пигментов и нарушения работы фотосистем [30]. Алюминий приводит к дефициту кальция и магния, препятствуя их поглощению растительными клетками [7, 36]. Однако алюминий может благотворно влиять на рост некоторых растений [34]. Для ряда древесных и возделываемых растений показано, что алюминий увеличивает содержание хлорофилла, каротиноидов, сахаров, аминокислот, гормонов и метаболитов шикиматного пути [27].

Анализ корреляции содержания фтора в листьях березы повислой с количеством и соотношением фотосинтезирующих пигментов не выявил достоверных значений связи данных показателей (табл. 2). Это может быть связано с тем, что содержание фтора в листьях берез, произрастающих под влиянием фторсодержащих выбросов, не достигает критических значений – от 50 до 500 мг/кг а.с.м. [5, 7]. Однако обнаружена положительная связь соотношений пигментов и содержания фтора в листьях (табл. 2), что свидетельствует об адаптивной реакции фотосинтетического аппарата березы на присутствие ионов фтора в листьях в концентрациях ниже пороговых. Фтор принадлежит к числу элементов, природная концентрация которых в растениях очень низка. Его среднее содержание в различных органах растений колеблется от 0,1 до 5 мг/кг а.с.м., однако может падать и до значительно меньшего уровня. Есть растения – аккумуляторы фтора. В различных видах чая фтора содержится 50–360 мг/кг, в листьях камелии – до 1370 мг. Листья березы накапливают в 3 раза больше этого элемента, чем другие породы в идентичных условиях [23]. Фтор, его летучие соединения и соли высокотоксичны [5]. Ионы фтора нарушают строение и проницаемость клеточных мембран, инактивируют некоторые ферменты, нарушают процесс дыхания и подавляют фотосинтез [18].

### *Заключение*

Таким образом, содержание фотосинтетических пигментов в листьях берез в древостоях, подвергающихся техногенному воздействию, несколько выше, чем в фоновых древостоях. Аккумуляция техногенной пыли на листьях



положительно коррелирует с содержанием пигментов, особенно хлорофилла *a*. Возможно, это связано с уменьшением светового потока из-за пылевого покрова на поверхности листьев. Содержание отдельных химических элементов в листовой массе не превышает уровней, считающихся критическими для нормальной продуктивной деятельности растений. Выявлены отрицательная корреляция количества пигментов, особенно хлорофилла *a*, с содержанием цинка и положительная – с содержанием алюминия. Не установлена корреляция содержания фотосинтетических пигментов с количеством свинца. Аккумуляция листьями фтора коррелирует с соотношениями пигментов – при накоплении фтора увеличивается отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b*, а также отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых.

В целом по физиолого-биохимическим характеристикам листового аппарата состояние древостоев березы повислой, произрастающих в пригородах г. Красноярск, при выявленных показателях загрязнения пылью, цинком, свинцом, алюминием и фтором можно считать удовлетворительным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барахтенова Л.А., Николаевский В.С. Влияние сернистого газа на фотосинтез растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 86 с.  
Barakhtenova L.A., Nikolayevskiy V.S. *Influence of Sulfur Dioxide on Plant Photosynthesis*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 86 p. (In Russ.).
2. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект: моногр. Ижевск: УдГУ, 2012. 206 с.  
Bukharina I.L., Zhuravleva A.N., Bolyshova O.G. *Urban Plantings: Ecological Aspect. Monograph*. Izhevsk, Izdatel'stvo of Udmurt University Publ., 2012. 206 p. (In Russ.).
3. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 3. С. 68–73.  
Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu., Titov A.F. Patterns of Heavy Metal Accumulation in Leaves of Trees in Urban Areas in the North. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Transactions of KarRC RAS, 2013, no. 3, pp. 68–73. (In Russ.).
4. Гетко Н.В. Растения в техногенной среде. Структура и функция ассимиляционного аппарата. Минск: Наука и техника, 1989. 205 с.  
Getko N.V. *Plants in Technogenic Environment. Structure and Function of Assimilation Apparatus*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 205 p. (In Russ.).
5. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды / пер. с англ. Н.С. Гельман; под ред. Г.М. Илькуна. М.: Мир, 1979. 200 с.  
Guderian R. *Air Pollution*. Transl. from English N.S. Gelman, Ed. by G.M. Ilkun. Moscow, MIR Publ., 1979. 200 p. (In Russ.).
6. Детри Ж.-П. Атмосфера должна быть чистой: загрязнители атмосферы и борьба с ними. М.: Прогресс, 1973. 380 с.  
Detri Zh.-P. *The Atmosphere Must Be Clean: Atmospheric Pollutants and Counteraction Against Them*. Moscow, Progress Publ., 1973. 380 p. (In Russ.).
7. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.  
Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Trace Elements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. (In Russ.).
8. Кавеленова Л.М., Малыхина Е.В., Розно С.А., Смирнов Ю.В. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений // Поволж. экол. журн. 2008. № 3. С. 200–210.

Kavelenova L.M., Malykhina E.V., Rozno S.A., Smirnov Yu.V. The Methodology Ecophysiological Studies of the Leaves of Woody Plants. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* = Journal of Ecology of the Volga, 2008, no. 3, pp. 200–210. (In Russ.).

9. Казнина Н.М., Батова Ю.В., Лайдинен Г.Ф., Титов А.Ф. Влияние цинка на рост и фотосинтетический аппарат растений пшеницы в условиях оптимума и гипотермии // Тр. КарНЦ РАН. 2017. № 12. С. 118–124.

Kaznina N.M., Batova Yu.V., Laydinen G.F., Titov A.F. The Effect of Zinc on the Growth and Photosynthetic Apparatus of Wheat Under Optimal and Hypothermic Conditions. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* = Transactions of KarRC RAS, 2017, no. 12, pp. 118–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb676>

10. Коротченко И.С. Воздействие автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // Успехи современ. естествознания. 2014. № 11-2. С. 109–110.

Korotchenko I.S. Influence of Motor Vehicles on the Pigment Complex of Woody Plants Leaves. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2014, no. 11-2, pp. 109–110. (In Russ.).

11. Коршиков И.И. Устойчивость растений к техногенным загрязнителям окружающей среды // Промышленная ботаника. 2004. Вып. 4. С. 46–57.

Korshikov I.I. Plant Resistance to Technogenic Environmental Pollutants. *Promyshlennaya botanika* = Industrial Botany, 2004, no. 4, pp. 46–57. (In Russ.).

12. Мальхотра С.С., Хан А.А. Биохимическое и физиологическое действие приоритетных загрязняющих веществ // Загрязнение воздуха и жизнь растений / М. Трешоу, Д.Г. Жиллет, Э. Робинсон и др.; под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 141–190.

Malkhotra S.S., Khan A.A. Biochemical and Physiological Impact of Major Pollutants. *Air Pollution and Plant Life*. Ed. by M. Treshou. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, pp. 141–190. (In Russ.).

13. Маракеев О.А., Смирнова Н.С., Загоскина Н.В. Техногенный стресс и его влияние на листовые древесные растения (на примере парков г. Ярославля) // Экология. 2006. № 6. С. 410–414.

Marakayev O.A., Smirnova N.S., Zagoskina N.V. Technogenic Stress and Its Effect on Deciduous Trees (A Case Study of Parks in Yaroslavl). *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 2006, no. 6, pp. 410–414. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1067413606060026>

14. Неверова О.А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (на примере г. Кемерово): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2004. 36 с.

Neverova O.A. *Ecological Assessment of the State of Woody Plants and Environmental Pollution of an Industrial City* (A Case Study of Kemerovo): Dr. Biol. Sci. Diss. Moscow, 2004. 36 p. (In Russ.).

15. Неверова О.А. Опыт мониторинга городских древесных насаждений (на примере г. Кемерово) // Урбоэко системы: Проблемы и перспективы развития: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Ишим, 20–21 марта 2008 г. Ишим: ИГПИ им. П.П. Ершова, 2008. Вып. 3. С. 125–128.

Neverova O.A. Experience in Monitoring Urban Tree Stands (A Case Study of Kemerovo). *Urban Ecosystems: Problems and Prospects for Development. Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference, Ishim, March 20–21, 2008*. Ishim, Ishim State Pedagogical Institute named after P.P. Ershov Publ., 2008, no. 3, pp. 125–128. (In Russ.).

16. Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. 2009. Т. 1, № 1. С. 82–92.

Neverova O.A. Phytoindication in Assessing of Environmental Pollution. *Biosfera*, 2009, vol. 1, no.1, pp. 82–92. (In Russ.).

17. Негруцкий С.Ф., Приседский Ю.Г., Еремка Е.В. Некоторые закономерности сравнительной устойчивости лесных древесных растений к атмосферным загрязнителям //

Взаимодействие между лесными экосистемами и загрязнителями: тез. докл. 1-го совет.-амер. симп. по проекту 02.03-21, Ленинград, Таллин, Пушкино, 11–20 окт. 1982 г. Таллин: АН ЭССР, 1982. С. 58–60.

Negrutskiy S.F., Prisedskiy Yu.G. Several Patterns of Relative Tolerance of Forest Woody Plants to Atmospheric Pollutants. *Interaction Between Forest Ecosystems and Atmospheric Pollutants: Proceedings of the 1st Soviet-American Symposium on project 02.03-21. Leningrad, Tallinn, Pushchino, October 11–20, 1982.* Tallinn, Akademiya nauk E`stonskoj SSR Publ., 1982, pp. 58–60. (In Russ.).

18. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1979. 278 с.

Nikolayevskiy V.S. *Biological Principles of Gas Resistivity for Plants.* Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 278 p. (In Russ.).

19. Павлов И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2006. 359 с.

Pavlov I.N. *Woody Plants Under Conditions of Technogenic Pollution.* Ulan-Ude, BNC SB RAS Publ., 2006. 359 p. (In Russ.).

20. Скрипальщикова Л.Н., Пономарева Т.В., Бажина Е.В., Барченков А.П., Белянин А.В. Техногенные нагрузки на березняки Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 130–135.

Skripalshchikova L.N., Ponomareva T.V., Bazhina E.V., Barchenkov A.P., Belyanin A.V. Technogenic Loads on Birch Stands in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 130–135. (In Russ.).

21. Тарчевский И.А. Основы фотосинтеза. Казань: Казан. ун-т, 1971. 294 с.

Tarchevskiy I.A. *Principles of Photosynthesis.* Kazan, Izdatel'stvo of Kazan Federal University Publ., 1971. 294 p. (In Russ.).

22. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.

Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Heavy Metals and Plants.* Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2014. 194 p. (In Russ.).

23. Хальбваш Г. Реакция организмов высших растений на загрязнение атмосферы двуокисью серы и фторидами // Загрязнение воздуха и жизнь растений / М. Трешоу, Д.Г. Жиллет, Э. Робинсон и др.; под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 206–246.

Khalbvash G. Reaction of Higher Plants Bodies to Atmospheric Pollution by Sulfur Dioxide and Fluorides. *Air Pollution and Plant Life.* Ed. by M. Treshou. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, pp. 206–246. (In Russ.).

24. Цандекова О.Л., Неверова О.А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // Изв. СамНЦ РАН. 2010. Т. 12, № 1(3). С. 853–856.

Tsandekova O.L., Neverova O.A. Influence of Motor Transport Emissions on the Woody Plants Leaves Pigmentary Complex. *Izvestia of SamSC RAS*, 2010, vol. 12, no. 1(3), pp. 853–856. (In Russ.).

25. Шергина О.В., Михайлова Т.А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2007. 200 с.

Shergina O.V., Mikhaylova T.A. *The State of Woody Plants and Soil Cover of Public Parks and Forest Park Areas of Irkutsk.* Irkutsk, Izdatel'stvo of IG SB RAS Publ., 2007. 200 p. (In Russ.).

26. Яшин Д.А., Зайцев Г.А. Содержание пигментов фотосинтеза в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях Уфимского промышленного центра // Изв. СамНЦ РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 274–277.

Yashin D.A., Zaytsev G.A. The Maintenance of Photosynthesis Pigments in Leaves of European White Birch (*Betula pendula* Roth.) and English Oak (*Quercus robur* L.) in the Conditions of Ufa Industrial Center. *Izvestia of SamSC RAS*, 2015, vol. 17, no. 6, pp. 274–277. (In Russ.).

27. Bojórquez-Quintal E., Escalante-Magaña C., Echevarría-Machado I., Martínez-Estévez M. Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>

28. Castillo-González J., Ojeda-Barrios D., Hernández-Rodríguez A., González-Franco A.C., Robles-Hernández L., López-Ochoa G.R. Zinc Metalloenzymes in Plants. *Interciencia*, 2018, vol. 43, pp. 242–248.

29. Escudero-Almanza D.J., Ojeda-Barrios D.L., Hernández-Rodríguez O.A., Chávez E.S., Ruíz-Anchondo T., Sida-Arreola J.P. Carbonic Anhydrase and Zinc in Plant Physiology. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2012, vol. 72, no. 1, pp. 140–146. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392012000100022>

30. Golovko T.K., Gruszecki W.I., Prasad M.N.V., Strzalka K. *Photosynthetic Pigments: Chemical Structure, Biological Function and Ecology*. Syktyvkar, Komi SC UB RAS Publ., 2014. 448 p.

31. Lichtenthaler H.K., Ac A., Marek M.V., Kalina J., Urban O. Differences in Pigment Composition, Photosynthetic Rates and Chlorophyll Fluorescence Images of Sun and Shade Leaves of Four Tree Species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, vol. 45, no. 8, pp. 577–588. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.04.006>

32. Lichtenthaler H.K., Buschmann C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. F4.3.1.–F4.3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>

33. Ma J.F. Syndrome of Aluminum Toxicity and Diversity of Aluminum Resistance in Higher Plants. *International Review of Cytology*, 2007, vol. 264, pp. 225–252. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(07\)64005-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(07)64005-4)

34. Mossor-Pietraszewska T. Effect of Aluminium on Plant Growth and Metabolism. *Acta Biochimica Polonica*, 2001, vol. 48, no. 3, pp. 673–686. [https://doi.org/10.18388/abp.2001\\_3902](https://doi.org/10.18388/abp.2001_3902)

35. Rout G.R., Das P. Effect of Metal Toxicity on Plant Growth and Metabolism: I. Zinc. *Agronomie*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 3–11. <https://doi.org/10.1051/agro:2002073>

36. Rout G.R., Samantaray S., Das P. Aluminium Toxicity in Plants: A Review. *Agronomie*, 2001, vol. 21, no. 1, pp. 3–21. <https://doi.org/10.1051/agro:2001105>

37. Sharma P., Dubey R.S. Lead Toxicity in Plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 35–52. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>

38. Silva S. Aluminium Toxicity Targets in Plants. *Journal of Botany*, 2012, vol. 2012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2012/219462>

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

Научная статья  
УДК 575.174:582.475  
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-48-68

### Микросателлитные локусы в генетической оценке плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* L.

А.А. Ильинов, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [L-5854-2013](https://orcid.org/0000-0003-3416-0312).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3416-0312>

Б.В. Раевский<sup>✉</sup>, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [K-6424-2018](https://orcid.org/0000-0002-1315-8937).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-8937>

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; ialex33@yandex.ru, borisraevsky@gmail.com<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 22.03.21 / Одобрена после рецензирования 19.06.21 / Принята к печати 21.06.21

**Аннотация.** С помощью 4-ядерных микросателлитных локусов осуществлена сравнительная оценка уровня генетического разнообразия Петрозаводской и Заонежской лесосеменных плантаций сосны обыкновенной I порядка и испытательных культур, созданных полусибсовыми семенными потомствами клонов с Петрозаводской лесосеменной плантации. Для выявления нуль-аллелей и исключения ошибок генотипирования использована программа Micro-Checker. Для изучения генетической структуры селекционных объектов с точки зрения пропорции редких и наиболее общих аллелей для каждого отобранного дерева определены коэффициенты генетической оригинальности. На лесосеменных плантациях и в испытательных культурах обнаружена значительная доля (27,3–37,0 %) наиболее редких и, напротив, невысокая доля наиболее типичных (3,3–14,8 %) аллелей для данной части ареала сосны. Для Петрозаводской лесосеменной плантации установлено наибольшее число (40) аллелей из всех выявленных (51). Тест на соответствие частот аллелей ожидаемым по Харди–Вайнбергу показал достоверный дефицит гетерозигот на обеих лесосеменных плантациях и в испытательных культурах. Все селекционные объекты характеризовались высоким уровнем аллельного и генетического разнообразия (среднее число аллелей на локус – 7,75–10,50; среднее эффективное число аллелей – 5,00–6,54; наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность соответственно – 0,60–0,70 и 0,63–0,71), обнаруженные отличия оказались статистически недостоверными. Результаты молекулярной дисперсии AMOVA (5 %) свидетельствуют об отсутствии значительной генетической дифференциации между селекционными объектами. Причина дефицита гетерозигот – не только наличие нуль-аллелей. В процессе селекции в итоге случайного отбора ограниченного числа генотипов (клонов) соотношение частот аллелей может не соответствовать соотношению в естественной популяции. Выявленный у селекционных объектов высокий уровень наиболее редких для данной части ареала сосны аллелей также можно объяснить влиянием отбора. Полученные результаты будут использованы при создании селекционных объектов повышенной генетической ценности.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, микросателлиты, коэффициент генетической оригинальности, генетическое разнообразие, лесосеменные плантации, испытательные культуры



**Для цитирования:** Ильинов А.А., Раевский Б.В. Микросателлитные локусы в генетической оценке плюсовых деревьев *Pinus sylvestris* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 48–68. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-48-68>

Original article

## Genetic Evaluation by Microsatellite Loci of *Pinus sylvestris* L. Plus Trees

Alexey A. Ilinov, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [L-5854-2013](https://orcid.org/0000-0003-3416-0312),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3416-0312>

Boris V. Raevsky<sup>✉</sup>, Doctor of Agriculture Sciences; ResearcherID: [K-6424-2018](https://orcid.org/0000-0002-1315-8937),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-8937>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; [ialex33@yandex.ru](mailto:ialex33@yandex.ru), [borisraevsky@gmail.com](mailto:borisraevsky@gmail.com)<sup>✉</sup>

Received on March 22, 2021 / Approved after reviewing on June 19, 2021 / Accepted on June 21, 2021

**Abstract.** In this study, a comparative analysis was performed to estimate the genetic diversity levels of *Pinus sylvestris* L. in 49 seed orchards of I generation and progeny test plantings using 4-nucleus microsatellite loci. The seed orchards are located in the Petrozavodsk and Zaonezhye regions of the Republic of Karelia. The progeny trials were created by half-sibling seed progenies of the clones in the Petrozavodsk seed orchard. Micro-Checker software was used to identify null alleles and exclude genotyping errors. Coefficients of genetic originality were determined by examining the genetic structure of breeding objects in relation to the proportion between the rare and the dominant alleles for each selected tree. A major part of the rarest alleles (27.3–37.0 %) and a small fraction of the most common alleles (3.3–14.8 %) were detected for the distinct range of the pine trees in both seed orchards and test cultures. The largest number (40) of all identified alleles (51) was found in the Petrozavodsk seed orchard. The Hardy-Weinberg test comparing allele rates to expectational values showed a lack of heterozygotes in each category of the empirical substances. The selected material also had high levels of allelic and genetic diversity. The average number of alleles per locus ranged from 7.75 to 10.50. The average effective number was from 5.00 to 6.54. The observed heterozygosity varied from 0.60 to 0.70. The expected heterozygosity was 0.63–0.71. The numerical deviations were statistically insignificant. The AMOVA molecular dispersion result was 5 %, indicating the absence of significant genetic differentiation between the breeding objects. The heterozygote deficiency was caused not only by the presence of null alleles, but also by the selection. Namely, the set of alleles in the experimental material, randomly selected from a limited number of genotypes (clones), may differ from the natural population. The high level of the rarest alleles in the given range of the pine trees can also be explained as a selection effect. The results obtained in this study are important for creating breeding objects with higher genetic value.

**Key words:** Scots pine, microsatellites, coefficient of genetic originality, genetic diversity, forest seed orchards, test cultures

**For citation:** Ilinov A.A., Raevsky B.V. Genetic Evaluation by Microsatellite Loci of *Pinus sylvestris* L. Plus Trees. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 3, pp. 48–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-48-68>



*Введение*

Важнейшим аспектом проблемы сохранения биоразнообразия лесов является сохранение генетического разнообразия популяций древесных видов [11, 13, 15, 20, 22, 28, 32]. Один из путей достижения этого – проведение мероприятий, направленных на сохранение генетических ресурсов вне пределов естественных популяций (*ex situ*). Прежде всего, речь идет о создании и эффективном использовании постоянной лесосеменной базы как основного источника генетически улучшенных семян для целей лесовосстановления. К селекционным объектам относятся плюсовые насаждения (ПН), плюсовые деревья (ПД), клоновые лесосеменные плантации (ЛСП), архивы клонов (АК) и испытательные культуры (ИК) [1]. При закладке ЛСП I порядка используется привойный материал, заготовленный с ПД, отобранных исключительно по фенотипу. Как правило, какая-либо специальная информация о генетической ценности отбираемого ПД отсутствует. В результате при использовании семян, собранных с таких ЛСП, могут измениться генетическая структура и уровень генетической изменчивости, свойственные естественным популяциям, что способно отразиться на эффективности всего процесса искусственного лесовосстановления [10, 12, 23, 26].

В Карелии при реализации системы плюсовой селекции основных лесобразующих видов (сосны обыкновенной и ели финской) были созданы 6 прививочных ЛСП I порядка общей площадью около 454 га, в том числе сосны – 365 га. Растущие на них вегетативные потомства (клоны) – итог массового отбора лучших (плюсовых) деревьев по фенотипу. До недавнего времени селекционно-генетическая оценка клонов ПД, представленных на ЛСП, не проводилась. Отсутствие какой-либо информации о генетической ценности этих деревьев препятствовало переходу к закладке ЛСП повышенной генетической ценности.

В последние десятилетия интерес к генетическим аспектам плюсовой селекции усилился благодаря развитию и применению новых молекулярно-генетических методов с использованием ДНК-маркеров. Однако публикации по этой проблеме, особенно в отечественной литературе, носят единичный характер [2, 6]. Ранее на основе микросателлитного анализа была дана оценка уровня генетического разнообразия естественных карельских популяций, ЛСП сосны обыкновенной и ели финской, 2 ПН сосны, а также описана их генетическая структура [3–5].

Таким образом, актуальность изучения особенностей генетической структуры и уровня генетического разнообразия на селекционных объектах диктуется проблемой сохранения в практике искусственного лесовосстановления и селекционного семеноводства основных лесобразующих пород генетического разнообразия, свойственного их естественным ценозам. Цель исследования – сравнительная оценка генетической структуры и уровня генетического разнообразия на клоновых ЛСП I порядка и в ИК сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Карелии.

*Объекты и методы исследования*

Объектами исследований стали клоновые ЛСП I порядка – Петрозаводская и Заонежская – и ИК (пос. Маньга) сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), представленные полусибсовыми семенными потомствами клонов с Петрозаводской ЛСП (табл. 1, рис. 1).



Таблица 1

**Информация об исследованных селекционных объектах**  
**Information about the investigated breeding objects**

Селекционный объект	Географическое положение, ...°		Площадь, га	Год закладки
	с. ш.	в. д.		
Петрозаводская ЛСП	61,92009	34,41364	150,7	1975–1996
Заонежская ЛСП	62,29852	34,96531	82,6	1978–1996
ИК, пос. Маньга	61,63154	33,43291	4,0	2012

*а**б*

Рис. 1. Исследованные селекционные объекты: *а* – Петрозаводская клоновая ЛСП; *б* – ИК, пос. Маньга

Fig. 1. The investigated breeding objects: *а* – forest seed orchard in Petrozavodsk; *б* – test planting, pos. Manga

ЛСП были созданы производственными подразделениями Министерства лесного хозяйства Республики Карелии в последней трети XX столетия в Прионежском и Медвежьегорском районах Карелии (подзона средней тайги). ЛСП заложены в разные годы в типичных для Карелии холмисто-грядовых моренных ландшафтах, на дренированных слабо- и среднеподзолистых супесчаных почвах. Прививки высажены по схеме 5×8 м. Опытный участок ИК создан весной 2012 г. сотрудниками лаборатории лесовосстановления Института леса Карельского научного центра РАН в Пряжинском районе Карелии, также при содействии республиканского Министерства природопользования и экологии. Для закладки ИК выбрана территория бывшего лесного питомника, располагавшегося на песчаных иллювиально-железистых подзолах, что является типичным для таких объектов. Всего высажено 72 варианта, 1×3 м (полусибсовых потомств), в 3–4-кратных повторностях, а также 5 повторностей контроля. Контролем служил общий образец семян с Петрозаводской ЛСП. Схема смешения вариантов – рендомезированная, рядами.

В 2007–2011 гг. на Петрозаводской ЛСП проведена комплексная селекционно-генетическая оценка 72 клоновых потомств сосны обыкновенной. Отобранные для наблюдений клоны (по 5 нормально развитых рамет на каждый клон) произрастали в пределах одного поля плантации, заложенного в 1982–1984 гг. Методика комплексной оценки вегетативных потомств сосны обыкновенной

Таблица 2

Сведения о материнских плюсовых деревьях  
Information about maternal plus trees

№ ПД	Географические координаты, ...		Лесничество	Тип леса	Характеристика ПД				Год отбора		
	с. ш.	в. д.			Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Превышение, % ** по высоте по диаметру			
<i>Северокарельский лесосеменной район</i>											
1143*	66,03115	33,02971	Чупинское	Черничный	96	23	28	109,5	133,3	1983	
1201*	65,58507	30,46405	Калевальское		105	26	31	123,8	147,6	185,7	1984
1202*											
1134*	65,50867	30,39988	Калевальское		114	24	27	114,3	128,6	1983	
671*	65,21076	30,11390			76	27	31	128,6	129,2	1979	
<i>Центральнокарельский лесосеменной район</i>											
997*	63,90118	34,35494	Сегежское	Черничный	110	27	31,5	121,6	132,4	1982	
1007*					145	25,5	31	114,9	130,3		
1081*	63,33092	33,40714	76		33		127,5	150,0	1983		
1095*			80		25	26	125,0	118,2			
1038	63,02872	34,07558	Медвежьегорское		120	26	28,5	118,2	129,5	1982	
1049*	63,01019	34,01969		80	22,5	27	112,5	135,0			
1026	63,00897	34,07675		88	24,5	28,5	111,4	129,5			
1027*			87	25	29	113,6	131,8				

Продолжение табл. 2

№ ПД	Географические координаты, ...		Лесничество	Тип леса	Характеристика ПД				Год отбора	
	с. ш.	в. д.			Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Превышение, %** по высоте по диаметру		
<i>Южнокарельский лесосеменной район</i>										
1046*	62,85304	34,89227	Медвежьегорское	Брусливый	135	24,5	30	116,7	150,0	1982
439*	62,74728	34,56553	Заонежское	Черничный	60	20	22	153,8	146,7	1977
432	62,61508	34,97982			56	19	25	126,7	138,9	
437			53			23	126,7	127,8		
505					75	28	28	140,0	127,3	1978
508	62,60891	34,38541	Кондопожское	70	30	31	150,0	140,9		
510				65	24,5	27	122,5	122,7		
448	62,47570	34,74433	Заонежское		70	28	30	186,7	200,0	1977
835				Кисличный	85	24	32	120,0	145,5	1980
861	62,45538	33,66628	Кондопожское	Черничный	80	27	29	108,0	120,8	1981
864					90	30	33	120,0	137,5	
871					85	29	34	116,0	141,7	
752	62,45092	34,85057	Заонежское	Травяно-сфагновый	95	24	33	160,0	220,0	1980

Продолжение табл. 2

№ ПД	Географические координаты, ...		Лесничество	Тип леса	Характеристика ПД					Год отбора
	с. ш.	в. д.			Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Превышение, %**		
							по высоте	по диаметру		
33*	62,40332	33,68707		Вересковый	101	26	27	146,1	135,0	1974
36	62,36648	33,90141			110	28	31,5	131,9	131,3	1973
37					115	25,5	35	121,4	145,8	
353	62,34988	33,91504	Кондопожское		120	28,5	43	129,5	153,6	1976
513					75	29,5	28	128,3	116,7	
515	62,34689	34,50933			75	29,5	30	128,3	125,0	1978
516					76	30	27	130,4	112,5	
849					90	26	32	118,2	123,1	1981
876	62,20560	33,34322	Спасогубское	Черничный	75	27	28	122,7	107,7	
962	62,19303	34,40828			80	29	37	111,5	142,3	1982
40	62,16714	34,38418			100	27,7	29	115,4	103,6	1973
522					70	30,5	32	138,6	145,5	1978
528	62,12057	34,49504			80	32,5	38	147,7	172,7	
853					100	32	34	123,1	121,4	1981
59						27	32	142,1	160,0	
60						25	28	131,6	140,0	1973
62	62,11988	34,51438			110	27	32	142,1	160,0	
63						25		131,6		
361					90	26,5	30	115,2	125,0	1976

Окончание табл. 2

№ ПД	Географические координаты, ...°		Лесничество	Тип леса	Возраст, лет	Характеристика ПД			Год отбора	
	с. ш.	в. д.				Высота, м	Диаметр, см	Превышение, %** по высоте по диаметру		
104					96	29	31	102,5	110,7	
107	62,03970	33,90698	Спасогубское	Травяно-злаковый	93	29	30	103,6	107,1	1973
114					98	28,5	26	101,8	92,9	
780					90	25	34	125,0	130,8	
841	61,89732	34,38784	Петрозаводское	Черничный	70	24	28	133,3	127,3	1980
754*	61,80900	37,03428			100	32	40	177,8	222,2	
1221*					94	33	43	122,2	153,6	
1231*	61,78013	36,20031	Пудожское	Кисличный	96	29	35	107,4	125,0	1985
1233*						32	34	119,6	121,4	
578	61,69742	34,3193	Петрозаводское	Черничный	106	26	30	123,8	136,4	1978
157					110	30	46	142,9	164,3	
163*	61,61583	30,0147	Лахденпохское	Кисличный	130	27	40	122,7	125,0	1973
				Брусничный						
651	61,41908	34,66236	Ладвинское	Черничный	82	28	34	116,7	130,8	1979
657					80	28,5	32,5	118,8	125,0	
644	61,41832	34,68516			118	26	32	117,3	114,3	
804	61,37383	33,6677	Пряжинское		70	23	24	121,1	126,3	1980
815						24,5	27	128,9	142,1	

\*Вегетативное потомство (клоны) произрастает на Заонежской ЛСП. \*\*Превышения по высоте и диаметру даны в сравнении со средними показателями.

подробно изложена ранее [8]. Параметры материнских ПД приведены в табл. 2. Все отобранные деревья характеризовались хорошим очищением стволов от сучьев, прямоствольностью, полнодревесностью, а также отсутствием дефектов и пороков. Основные параметры вегетативных потомств (клонов) материнских ПД указаны в табл. 3. В 2011 г. образцы семян с исследуемых клонов были высеяны в теплице питомника «Вилга». Сеянцы с закрытой корневой системой выращивали по стандартной технологии отдельно по семьям. Общая комбинационная способность (ОКС) рассчитана как относительное преимущество (%) того или иного варианта (семьи) над контролем по результатам замеров общей высоты растений в 2018 г.

На Петрозаводской и Заонежской ЛСП, а также в ИК были отобраны образцы хвой с 30, 22 и 27 деревьев соответственно. На Заонежской ЛСП взят только материал для генетического анализа, без описания клонов. Выделение образцов геномной ДНК сосны осуществлено с помощью стандартного набора (Qiagen).

Для анализа генетической структуры селекционных объектов сосны взято 4 микросателлитных локуса: PtTX2123, PtTX2146, SPAC11,8, SPAC12,5 [16, 31]. Для проведения полимеразной цепной реакции использовали 26 мкл реакционной смеси следующего состава: 50 нг ДНК исследуемых образцов, 100 пм праймера, 5 мкл набора с Taq ДНК-полимеразой. Условия амплификации: денатурация – 30 с при 94 °С, отжиг – 30 с при 54–57 °С (в зависимости от используемого праймера), полимеризация – 40 с при 72 °С; количество циклов – 35; достраивание фрагментов – 6 мин при 72 °С. Амплификацию проводили на приборе MaxuGene Gradient (Qiagen). Разделение и определение фрагментов ДНК осуществляли с помощью системы капиллярного электрофореза на приборе SEQ 8000 (Beckman Coulter).

Для изучения генетической структуры селекционных объектов с точки зрения пропорции редких и наиболее общих аллелей для каждого отобранного дерева были установлены коэффициенты генетической оригинальности (КГО) [7, 9]. Определение основных показателей генетической изменчивости – среднее число аллелей на локус, нередких аллелей (с частотой > 5 %) и уникальных аллелей на локус, среднее эффективное число аллелей, наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность, индекс фиксации Райта, а также AMOVA с целью выявления уровня генетической дифференциации проводили с помощью программы GenAlEx 6.5 [30]. Соответствие наблюдаемых частот аллелей ожидаемым согласно равновесию Харди–Вайнберга оценивали на основе теста  $\chi^2$ . Для обнаружения и исключения возможных вариантов ошибок генотипирования ядерных микросателлитных локусов использована программа Micro-Checker [33].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

При сравнительной оценке свойств материнских ПД и их вегетативного потомства было обнаружено, что произрастающие на выравненном фоне клоны ПД не всегда сохраняют качества «плюсовости», характерные для материнских деревьев. Все отобранные материнские деревья отличались отсутствием дефектов и пороков ствола, однако у 40 % их вегетативных потомств (клонов) были обнаружены такие пороки, как многоствольность, раздвоение ствола и снеголом (табл. 3). Оценка ОКС в 7-летних ИК показывает, что 49 % семенных потомств испытываемых деревьев не имеют статистически достоверного преимущества перед контролем. Эти факты могут свидетельствовать о том, что не всегда причиной «плюсовости» отдельных материнских деревьев являются их наследственные качества.

Таблица 3

Характеристика исследованных клонов на Петрозаводской ЛСП  
 Characteristics of the studied clones from the Petrozavodsk seed orchard

№ клона	Селекционный объект*	Высота**, м	Диаметр**, см	Возраст***, лет	Дефекты	Цветение****, балл		Длина шишки**, см	Масса шишки**, г	Масса 1000 семян**, г	Урожай семян****, шт.	ОКС*****
						мужское	женское					
36	ИК	9,9	19,3	7	–	3,7	3,3	4,1	2,2	6,5	9191	1,04
37		10,3	22,6			4,4	3,7	4,2	1,9	4,8	10 203	0,96
40	ЛСП/ИК	9,0	19,1	24/7	Снеголом	3,9	2,9	4,4	10,3	6,8	7218	1,00
59	ЛСП	10,3	21,3	24	–	4,1	3,3	4,1	1,9	5,4	5142	1,11
60	ЛСП/ИК	10,0	19,9	24/7	–	5,0	3,5	4,2	7,5	6,1	10 241	1,10
62		9,3	16,2		–	4,1	3,0	4,3	6,9	4,7	7059	
63	ИК	10,6	20,9	7	–	3,7	3,5	4,1	2,2	5,0	4796	1,11
104	ЛСП	7,3	15,2	24	Многоствольность	3,0	2,4	4,4	5,9	6,3	6465	1,00
107	ИК	9,8	20,1	7	Раздвоение	3,7	3,4	3,8		5,4	6012	1,20
114	ЛСП/ИК	10,4	20,9	24/7	–	4,7	2,6	4,1	5,8	4,6	5340	
157	ЛСП	6,8	21,2	24	Раздвоение	4,9	3,6	4,6	8,5	5,0	13 420	1,00
353		9,7	21,1		–	3,1	2,6	4,2	2,3	5,7	9114	
361	ИК	9,4	22,6	7	Многоствольность	4,5	2,4	4,5	7,7	6,0	4935	
432	ЛСП/ИК	7,8	18,3	24/7	–	4,2	4,4	4,3	6,9	5,7	19 687	
437	ЛСП	8,0	17,3	24	Раздвоение	4,8	4,3	4,2	6,2	4,2	10 203	1,10
448	ИК	9,5	20,3	7	–	3,0	3,7		2,0	5,7	14 521	0,97
504		9,4	19,7		Многоствольность	4,4	3,1	4,4	8,2	6,7	5723	1,10



Продолжение табл. 3

№ клона	Селекционный объект*	Высота**, м	Диаметр**, см	Возраст***, лет	Дефекты	Цветение****, балл		Длина шишки**, см	Масса шишки**, г	Масса 1000 семян**, г	Урожай семян****, шт.	ОКС*****
						муж-ское	жен-ское					
505	ЛСП	9,7	21,3	24	Раздвоение	3,0	2,5	4,3	7,0	6,1	4032	1,20
508	ИК	9,9	17,9	7	–	4,4	3,9	4,1	6,7	6,9	3414	1,10
510	ЛСП	9,8	20,4	24	–	4,5	3,1	4,2	7,3	6,7	5321	1,20
513		9,4	19,5			3,2	2,8	4,0	5,9	5,5	5165	
515		9,6	20,4			3,8	–	4,5	5,9	5,9	12 379	
516	ИК	10,4	21,1	7	Раздвоение	3,6	3,5	4,4	5,6	5,0	9040	1,00
522	ЛСП/ИК	10,1	23,6	24/7	–	3,3	2,0	4,2	6,1	6,2	2202	0,91
528	ЛСП	9,9	20,4	24	–	4,6	1,6	4,6	2,3	5,9	5463	
644	ЛСП/ИК	8,6	21,1	24/7	Много-ствольность	4,4	2,6	4,4	6,2	8,4	1930	0,90
651		9,6	18,5	–		4,5	3,4	4,3	6,3	6,1	2177	1,10
657						4,9	3,8	4,0	6,0	4,7	8803	
752	ЛСП	9,8	19,6	24	Снеголом	4,7	3,2	4,2	6,6	5,2	5702	1,20
804		9,2	19,9	–		4,5	3,0	–	6,8	6,8	4921	1,30
815	ИК	8,3	18,1	7	–	3,5	3,5	3,2	3,9	5,1	5548	1,20
835	ЛСП	10,0	20,7	24	–	4,9	–	3,6	4,6	3,6	8183	1,00
841	ИК	8,1	17,2	7	Много-ствольность	4,2	3,7	4,5	7,7	6,0	9409	
849		10,4	24,0	Раздвоение		3,9	4,0	7,8	5504	1,10		
804	ЛСП	9,2	19,9	24	Снеголом	4,5	3,0	4,2	6,8	6,8	4921	1,30
815	ИК	8,3	18,1	7	–	3,5	3,5	3,2	3,9	5,1	5548	1,20

Окончание табл. 3

№ клона	Селекционный объект*	Высота**, м	Диаметр**, см	Возраст***, лет	Дефекты	Цветение****, балл		Длина шишки**, см	Масса шишки**, г	Масса 1000 семян**, г	Урожай семян****, шт.	ОКС*****
						муж- ское	жен- ское					
835	ЛСП	10,0	20,7	24	–	4,9	3,7	3,6	4,6	3,6	8183	
841	ИК	8,1	17,2	7	Много- ствольность	4,2	4,0	4,5	7,7	6,0	9409	1,00
849		10,4	24,0			3,9						
853	ЛСП/ИК	10,1	20,7	24/7	Снеголом	4,5	3,4		8,0	5,6	6828	0,90
861	ИК	8,9	17,9	7	–	3,8	4,0	4,3	7,9	6,5	5899	1,00
864		10,3	20,4			4,1	3,7	4,4	5,6	5,1	11 139	1,30
871		8,9	17,3			2,6	3,2	4,6	9,7	6,8	11 047	1,00
876	ЛСП/ИК	10,2	20,6	24/7	–	4,0	4,1	4,5	6,5	5,4	13 652	1,30
962	ЛСП	9,3	20,5	24	–	4,1	3,2	4,0	7,3	5,8	6693	1,20
1026		6,2	13,5			2,4	4,1	4,4	7,8		12 525	1,00
1038	ЛСП/ИК	9,7	19,5	24/7	–	3,0	3,5	4,5	7,9	6,5	7601	0,90

\* Проводилась генетическая оценка клона (Петрозаводская ЛСП) / семенного потомства клона (ИК). \*\* Данные по клонам ЛСП за 2007. \*\*\* Возраст клонов на ЛСП и семенного потомства в ИК в 2007 и 2018 г. соответственно. \*\*\*\* Усредненные данные по ЛСП за 2007–2010 гг. \*\*\*\*\* ОКС семенного потомства клона в ИК по высоте по сравнению с контролем.

Иногда воздействие совокупности случайно сложившихся благоприятных для произрастания внешних условий может привести к появлению у дерева или группы деревьев признаков «плюсовости» в материнском плюсовом насаждении, но не проявиться впоследствии в выровненных условиях ЛСП, где наиболее наглядно видны наследственные характеристики. Данный факт подтверждает необходимость генетической идентификации потомства отобранных ПД, а также испытания генотипов на выравненном фоне (ЛСП, АК, ИК и т. п.).

Анализ генетической структуры селекционных объектов (табл. 4) показал, что все изученные локусы полиморфны. Всего найден 51 аллель. Наибольшее количество (40) обнаружено у Петрозаводской ЛСП, а у Заонежской ЛСП и в ИК – 30 и 32 аллеля соответственно. По количеству редких (24) и уникальных (10) аллелей также выделяется Петрозаводская ЛСП, у Заонежской ЛСП и ИК их почти в 2 раза меньше. Аллелей, общих для всех селекционных объектов, обнаружено 20, причем все они оказались с частотой  $> 0,05$ . Отдельный интерес представляет соотношение аллелей у клонов с Петрозаводской ЛСП и в ИК, являющихся семенным потомством этих клонов. Дополнительно у Петрозаводской ЛСП с ИК выявлено еще 6 общих аллелей, а у Заонежской ЛСП с ИК – всего один. Таким образом, у семенного потомства (ИК) найдено лишь 26 аллелей из 40 обнаруженных у клонов с Петрозаводской ЛСП.

Для оценки состояния генофонда в пределах конкретного региона в той или другой части ареала вида каждая популяция может быть охарактеризована с точки зрения пропорции редких и обычных (типичных для популяций данного региона) аллелей при помощи расчета КГО [7]. Этот способ классификации внутривидового разнообразия по результатам молекулярного маркирования основан на принципе «взвешивания» признаков в зависимости от частоты их встречаемости. В соответствии с методикой [7], на основе частот аллелей 4 микросателлитных локусов для характеристики каждого из селекционных объектов сосны обыкновенной были определены КГО по каждому отобранному дереву. Значения КГО были соотнесены с 5-балльной шкалой на основании распределения их логарифмов соответственно подразделению на 5 интервалов, отражающих последовательное увеличение доли редких аллелей в образцах: минимум–5-й перцентиль (I класс); 6–25-й перцентиль (II класс); 26–75-й (III класс); 76–95-й (VI класс); 96-й–максимум (V класс). На рис. 2 показано соотношение представителей 5 классов по КГО в структуре изученных селекционных объектов.

Для исследователей и селекционеров наиболее интересны группы деревьев двух крайних классов. Группы генотипов (деревьев) I класса практически не содержат редких аллелей. Такие группы в популяции можно было бы рассматривать в качестве наиболее типичных для региона образцов, представляющих собой базовый генофонд. В коллекциях генных банков эти образцы используют при создании так называемых стержневых коллекций [7]. Группы деревьев с максимальными значениями КГО (V класс) интересны тем, что содержат наибольшее число редких, нетипичных для региона аллелей.

Таблица 4

**Генетическая структура селекционных объектов сосны обыкновенной**  
**Genetic structure of Scots pine breeding objects**

Локус	Аллель	ЛСП		ИК	Локус	Аллель	ЛСП		ИК
		Петро- завод- ская	Зао- неж- ская				Петро- завод- ская	Зао- неж- ская	
PtTX2123	192	0,083	0,318	0,056	Spac11,8	154	0,017	–	–
	195	0,917	0,659	0,944		156	–	0,045	
	201	–	0,023	–		135	–	0,023	
	204	–	–	–		139	–	–	
PtTX2146	168	0,017	–	0,019	Spac12,5	141	0,017	–	–
	171					0,050			
	183	0,283	0,159	0,167		147	0,033	–	0,056
	186	–	0,023	–		149	0,067	0,136	0,074
	189	–	–	0,037		151	0,017	0,114	0,130
	195	0,183	0,136	0,204		153	0,033	–	0,037
	204	0,033	0,091	0,019		155	0,100	0,159	0,074
	210	–	–			157	0,067	0,114	0,056
	222	0,367	0,477	0,389		159	0,083	0,023	0,074
	228	0,083	0,091	0,130		161	0,050		0,111
	237	–	–	0,019		163	0,033	0,068	0,056
	243	0,017	0,023	–		165	0,050		0,130
	Spac11,8	132	0,067	–		–	167	–	–
134		0,500	0,273	0,241	169	–	0,023	0,056	
136		0,067	0,432	0,519	171	0,100		0,019	
138		0,033	0,136	0,167	173	0,117	0,045	–	
140		0,167	–	–	175	0,050	–	–	
142		0,017	0,114	–	177	0,017	0,068	–	
144		0,050	–	–	179	–	–	0,037	
146		0,033	–	0,019	183	0,050	–		
148		0,033	–	0,056	187	0,017	–	–	
152		0,017	–	–	199	–	0,045	–	

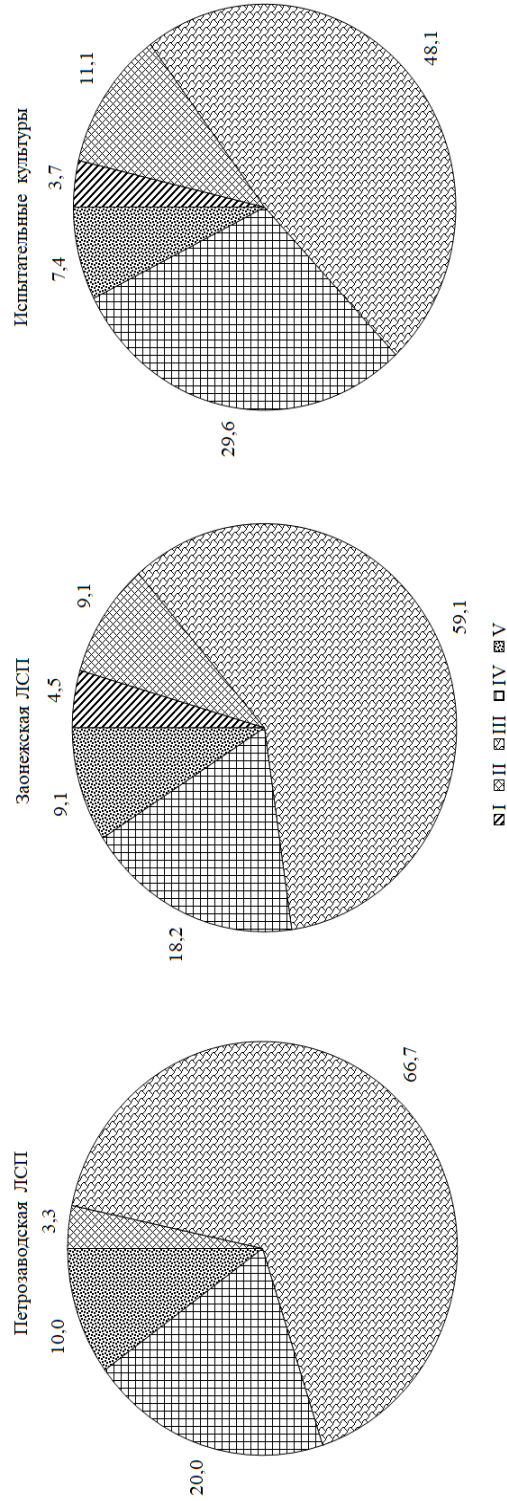


Рис. 2. Соотношение (%) представителей 5 классов (I–V) аллелей по КГО в структуре селекционных объектов сосны обыкновенной в Карелии

Fig. 2. Proportion (%) of representatives from five classes (I–V) of alleles by CGO within the composition of breeding objects of Scots pine in Karelia

Результаты сравнительного анализа генетической структуры селекционных объектов по КГО позволили обнаружить у клонов на ЛСП и их семенного потомства в ИК дефицит наиболее типичных для данной части ареала аллелей сосны обыкновенной (I и II классов), что указывает на недостаточную представленность базового генофонда – 3,3, 13,6 и 14,8 % на Петрозаводской, Заонежской ЛСП и в ИК соответственно. При этом доля как наиболее редких, так и среднетипичных аллелей в ИК, а также на обеих ЛСП оказалась достаточно высокой. Наибольшую долю в генотипах изученных деревьев на Петрозаводской и Заонежской ЛСП, а также в ИК составляли среднетипичные (III класс) для данной части ареала сосны обыкновенной аллели – 48,1, 59,1 и 66,7 % соответственно. У всех селекционных объектов обнаружены наиболее редкие аллели (IV и V классы), причем больше всего их оказалось в ИК и на Петрозаводской ЛСП – 37,0 и 30,0 % соответственно. Причины такого процентного распределения аллелей требуют дальнейшего изучения.

Анализ с использованием критерия  $\chi^2$  выявил достоверное несоответствие наблюдаемых и ожидаемых по правилу Харди–Вайнберга частот аллелей у всех селекционных объектов по локусам Spac11,8 и Spac12,5, а у ИК – и по локусу PtTX2123.

С помощью программы Micro-Checker установлено возможное присутствие нуль-аллеля по локусу Spac11,8 у всех изученных селекционных объектов. Значимый уровень нуль-аллеля ( $p > 0,05$ ) локуса Spac12,5 обнаружен только на Петрозаводской ЛСП. Учет при генотипировании нуль-аллелей позволил провести корректировку в целях получения несмещенной оценки уровня генетического разнообразия (табл. 5).

Таблица 5

**Уровень генетического разнообразия на селекционных объектах *Pinus sylvestris***  
**The level of genetic diversity in *P. sylvestris* breeding objects**

Селекционный объект	<i>A</i>	<i>A</i> <sub>95%</sub>	<i>PA</i>	<i>ne</i>	<i>Ho</i>	<i>He</i>	<i>F</i>
Петрозаводская ЛСП	10,50± ±3,77	6,00± ±2,41	2,75± ±1,31	6,54± ±3,36	0,63± ±0,16	0,66± ±0,17	-0,01± ±0,11
Заонежская ЛСП	7,75± ±2,56	5,00± ±1,22	1,25± ±0,25	5,00± ±1,90	0,70± ±0,10	0,71± ±0,09	0,01± ±0,06
ИК, пос. Маньга	8,25± ±2,95	5,25± ±1,70	1,25± ±0,75	5,40± ±2,42	0,60± ±0,19	0,63± ±0,19	0,17± ±0,17

Примечание: *A*, *A*<sub>95%</sub>, *PA* – среднее число аллелей на локус, редких аллелей и уникальных аллелей соответственно; *ne* – среднее эффективное число аллелей; *Ho*, *He* – наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность соответственно; *F* – коэффициент инбридинга.

Максимальные значения всех параметров аллельного разнообразия (*A*, *A*<sub>95%</sub> и *ne*) обнаружены для Петрозаводской ЛСП. Заонежская ЛСП характеризуется минимальными значениями этих параметров. Показатель уникальных аллелей для ИК и Заонежской ЛСП был одинаковым и в 2 раза меньшим, чем у Петрозаводской ЛСП.

Сравнительный анализ уровня генетического разнообразия селекционных объектов сосны обыкновенной показал, что все они отличаются высокими уровнями наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности (табл. 6), сравнимыми с

уровнями естественных популяций вида в Карелии [4]. При этом максимальными значениями  $H_o$  и  $H_e$  характеризуются клоны Заонежской ЛСП, а минимальными – семенное потомство клонов Петрозаводской ЛСП в ИК.

По соотношению наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности можно судить об уровне инбридинга внутри изучаемых селекционных объектов. В нашем случае наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность для каждого из объектов оказалась примерно одинаковой. Коэффициенты инбридинга, рассчитанные для Петрозаводской и Заонежской ЛСП, близки к нулю (табл. 6), что указывает на отсутствие дефицита гетерозигот на клоновых плантациях. Выявленное для ИК положительное значение коэффициента инбридинга статистически незначимо, что также свидетельствует об отсутствии дефицита гетерозигот у семенного потомства клонов ПД.

Статистический анализ не выявил значимых различий в уровне генетического, в том числе аллельного, разнообразия между селекционными объектами, созданными вегетативным и семенным потомством ПД, отобранных для Петрозаводской ЛСП и ИК в пределах Южнокарельского лесосеменного района, а для Заонежской ЛСП – со всех лесосеменных районов Карелии.

AMOVA позволяет изучить распределение обнаруженной генетической изменчивости между селекционными объектами сосны обыкновенной (табл. 6). Результаты AMOVA свидетельствуют о невысоком уровне дифференциации между Петрозаводской и Заонежской ЛСП и ИК – на различия между ними приходится всего 5 % от всей выявленной генетической изменчивости.

Таблица 6

**Результаты AMOVA для селекционных объектов сосны обыкновенной**  
**Results of AMOVA for the breeding objects of Scots pine**

Источник изменчивости	Df	SS	MS	Доля в общей дисперсии, %
Между селекционными объектами	2	13,570	6,785	5,033
Внутри селекционных объектов	76	216,228	2,845	94,967
Общая	78	229,797	–	–

Примечание: Df – число степеней свободы; SS – сумма квадратов отклонений; MS – дисперсия (варианса).

Таким образом, полученные результаты обнаружили высокий уровень аллельного и генетического разнообразия на всех изученных селекционных объектах. Как уже было отмечено выше, все существующие в Карелии клоновые плантации, используемые для сбора семян, относятся к ЛСП I порядка. Для получения семян генетически улучшенного качества и большего объема необходимо создание новых ЛСП, предпочтительно повышенной генетической ценности, что позволит иметь большую генетическую выгоду. Такой подход, для сравнения, давно практикуется в соседней Финляндии [18]. В зависимости от страны требуется разное количество клонов на ЛСП [19]. Для Финляндии V. Koski [21] предлагает не менее 40 клонов, D. Lindgren и F. Prescher [25] для Швеции – 20 клонов.

Следует учитывать, что поставленные селекционные цели должны быть компромиссом между различными функциями будущих лесов. Интенсивный отбор, приводящий к улучшению хозяйственно-ценных признаков, требует



уменьшения количества клонов, поскольку достигнутый генетический выигрыш увеличивается с большей интенсивностью отбора и, следовательно, с уменьшением количества выбранных деревьев [14, 17]. Это часто связано со снижением генетической изменчивости. В то же время поддержание высокого уровня генетической изменчивости может иметь особое значение при адаптации вида к изменениям, происходящим в окружающей среде [27]. Кроме того, генетическое разнообразие является основным источником вариантов, используемых в программах отбора. На ранней стадии селекции отобранные материнские деревья характеризуются высокой степенью генетической изменчивости, сравнимой с той, которая зафиксирована для естественных популяций этих видов [24, 29, 34].

Полученные данные по КГО для селекционных объектов выявили дефицит наиболее характерных для данного региона аллелей, что может указывать на недостаточную представленность базового генофонда на исследованных ЛСП и в ИК. Данный факт может свидетельствовать о том, что на генетическую структуру селекционных объектов определенное влияние оказывает процесс отбора отдельных генотипов (ПД) без учета их аллельного состава (отбор только по фенотипу), в итоге доля генотипов с наиболее типичными аллелями оказалась невысокой. При этом в генотипах вегетативного и семенного потомства ПД выявлено наличие большой доли (27–37 %) наиболее редких для данной части ареала сосны обыкновенной аллелей. Это может указывать на смешение генофондов различных локальных популяций, что и происходит при создании ЛСП I порядка. Наибольшее количество наиболее редких аллелей обнаружено в ИК, т. е. семенное потомство клонов ПД обладает самым высоким потенциалом генетической изменчивости.

### Заключение

Высокий уровень генетического разнообразия, характерный для объектов базового (исходного) уровня системы плюсовой селекции, к которому относятся вегетативные и семенные потомства плюсовых деревьев на лесосеменных плантациях I порядка и в испытательных культурах, является закономерным и обусловлен массовым типом отбора. Проблема сохранения биоразнообразия обостряется при переходе к селекционным объектам более высокого порядка, повышенной генетической ценности, создаваемых интенсивным индивидуальным отбором. Уровень генетического разнообразия может быть снижен не только на этапе отбора по фенотипу, но и во время последующих этапов селекции (контролируемое скрещивание), а также непосредственно при получении семян и сеянцев. Поэтому на всех этапах селекционного процесса должен систематически выполняться генетический мониторинг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ивановская С.И. Оценка генофонда сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в плюсовых насаждениях Беларуси по данным изоферментного анализа // Тр. БГТУ. № 1. Лесное хозяйство. 2014. № 1. С. 130–134.  
Ivanovskaya S.I. Evaluation of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Gene Pool in Plus Stands of Belarus According to Isozyme Analysis. *Trudy BSTU, Serie: Lesnoe khozyaistvo*, 2014, no. 1, pp. 130–134. (In Russ.).

2. Ивановская С.И., Барсукова М.М., Ревяко И.Д., Луферова Н.С., Падутов В.Е., Ревяко И.Д. Уровень генетической изменчивости у деревьев сосны обыкновенной различных селекционных категорий // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Минск: Ин-т леса НАН Беларуси, 2008. Вып. 68. С. 178–186.

Ivanovskaya S.I., Barsukova M.M., Revyako I.D., Luferova N.S., Padutov V.E., Revyako I.D. Level of Genetic Variability in Scots Pine Trees of Various Breeding Categories. *Problems of Forest Science and Forestry: Proceedings of Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus*. Minsk, 2008, vol. 68, pp. 178–186. (In Russ.).

3. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Сравнительная оценка генетического разнообразия естественных популяций и клоновых плантаций сосны обыкновенной и ели финской в Карелии // Экол. генетика. 2015. Т. XIII, № 4. С. 55–67.

Ilinov A.A., Raevsky B.V. Comparative Evaluation of the Genetic Diversity of Natural Populations and Clonal Seed Orchards of *Pinus sylvestris* L. and *Picea × fennica* (Regel) Kom. in Karelia. *Ekologicheskaya genetika* = Russian Journal of Genetics, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 55–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/ecogen13455-67>

4. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Состояние генофонда сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Карелии // Сиб. лесн. журн. 2016. № 5. С. 45–54.

Ilinov A.A., Raevsky B.V. The Current State of *Pinus sylvestris* L. Gene Pool in Karelia. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 5, pp. 45–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/sjfs20160504>

5. Ильинов А.А., Раевский Б.В. Использование микросателлитных локусов в изучении плюсового генофонда сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 6. С. 124–134.

Ilinov A.A., Raevsky B.V. Analysis of the *Pinus sylvestris* L. Plus Tree Gene Pool in Karelia Using Microsatellite Loci. *Proceedings of the Karelian RC RAS*. 2018, no. 6, pp. 124–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb840>

6. Новиков П.С., Шейкина О.В. ISSR-анализ деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) различных селекционных категорий // Науч. журн. КубГАУ. 2012. № 82(08). С. 100–112.

Novikov P.S., Sheikina O.V. ISSR Analysis of *Pinus sylvestris* Trees of Different Selection Categories. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU, 2012, vol. 82, no. 8, pp. 100–112. (In Russ.).

7. Потоккина Е.К., Александрова Т.Г. Методы классификации внутривидового разнообразия по результатам молекулярного маркирования // Материалы Всерос. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века», Петрозаводск, 22–27 сент. 2008 г. Ч. 3: Молекулярная систематика и биосистематика. Флора и систематика высших растений и флористика. Палеоботаника. Культурные и сорные растения. Ботаническое ресурсосведение и фармакогнозия. Охрана растительного мира. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 62–65.

Potokina E.K., Aleksandrova T.G. Methods for Classifying Intraspecific Diversity Based on the Results of Molecular Labeling. *Proceedings of All-Russian Conference "Fundamental and Applied Problems of Botany at the Beginning of XXI century"*, Petrozavodsk, September 22–27, 2008. Petrozavodsk, Karelian RC RAS Publ., 2008, pp. 62–65. (In Russ.).

8. Раевский Б.В., Щурова М.Л. Методика селекционно-генетической оценки клонов сосны обыкновенной на лесосеменных плантациях // Сиб. лесн. журн. 2016. № 5. С. 91–98.

Raevsky B.V., Schurova M.L. The Method for Breeding and Genetic Assessment of Scotch Pine Clones at Forest Seed Orchards. *Sibirskii lesnoi zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 5, pp. 91–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20160509>

9. Смирнов Е.С. О кодировании признаков для таксономического анализа // Журн. общ. биол. 1971. Т. 32, № 2. С. 224–228.

Smirnov E.S. On Coding Traits for Taxonomic Analysis. *Zhurnal obshchey biologii* = Journal of General Biology, 1971, vol. 32, no. 2, pp. 224–228. (In Russ.).

10. Степанова Е.М., Гончаренко Г.Г. Аллельное и генотипическое разнообразие в природных и искусственных насаждениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) // Молодой ученый. 2009. № 12(12). С. 122–124.

Stepanova E.M., Goncharenko G.G. Allelic and Genotypic Diversity in Natural and Artificial Forest Stands of *Pinus sylvestris*. *Molodoy uchenyj*, 2009, no. 12(12), pp. 122–124. (In Russ.).

11. Bergmann F., Ruetz W. Isozyme Genetic Variation and Heterozygosity in Random Tree Samples and Selected Orchard Clones from the Same Norway Spruce Populations. *Forest Ecology and Management*, 1991, vol. 46, no. 1-2, pp. 39–47. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90243-O](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90243-O)

12. Brown A.H.D., Moran G.F. Isozymes, and the Genetic Resources of Forest Trees. *Proceedings of the Symposium on Iso-Zymes of North American Forest Trees and Forest Insects, California, Berkeley, July 27, 1979*. California, Berkeley Publ., 1981, pp. 1–10.

13. Cheliak W.M., Murray G., Pitel J.A. Genetic Effects of Phenotypic Selection in White Spruce. *Forest Ecology and Management*, 1998, vol. 24, no. 2, pp. 139–149. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(88\)90117-X](https://doi.org/10.1016/0378-1127(88)90117-X)

14. Danusevicius D., Lindgren D. Two-Stage Selection Strategies in Tree Breeding Considering Gain, Diversity, Time and Cost. *Forest Genetics*, 2002, vol. 9, iss. 2, pp. 147–159.

15. El-Kassaby Y.A., Namkoong G. Genetic Diversity of Forest Tree Plantations: Consequences of Domestication. *Consequences of Changes in Biodiversity. Proceedings of IUFRO World Congress*. Finland, Tampere, 1995, vol. 2, pp. 218–228.

16. Elsik C.G., Minihan V.T., Hall S.E., Scarpa A.M., Williams C.G. Low-Copy Microsatellite Markers for *Pinus taeda* L. *Genome*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 550–555. <https://doi.org/10.1139/g00-002>

17. Funda T., Lstiburek M., Lachout P., Klápšte J., El-Kassaby Y.A. Optimization of Combined Genetic Gain and Diversity for Collection and Deployment of Seed Orchard Crops. *Tree Genetics and Genomes*, 2009, vol. 5, no. 4, pp. 583–593. <https://doi.org/10.1007/s11295-009-0211-3>

18. Haapanen M., Hynynen J., Ruotsalainen S., Siipilehto J., Kilpelyainen M.-L. Realised and Projected Gains in Growth, Quality and Simulated Yield of Genetically Improved Scots Pine in Southern Finland. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, no. 6, pp. 997–1009. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0989-0>

19. Ivetić V., Devetaković J., Nonić M., Stanković D., Šijačić-Nikolić M. Genetic Diversity and Forest Reproductive Material – from Seed Source Selection to Planting. *IForest: Biogeosciences and Forestry*, 2016, vol. 9, no. 5, pp. 801–812. <https://doi.org/10.3832/ifor1577-009>

20. Knowles P. Comparison of Isozyme Variation Among Natural Stands and Plantations: Jack Pine and Black Spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 1985, vol. 15, no. 5, pp. 902–908. <https://doi.org/10.1139/x85-145>

21. Koski V. A Note on Genetic Diversity in Natural Populations and Cultivated Stands of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 2000, vol. 9, no. 1, pp. 89–96.

22. Ledig F.T. The Conservation of Diversity in Forest Trees: Why and How Should Genes Be Conserved? *Bioscience*, 1988, vol. 38, no. 7, pp. 471–479. <https://doi.org/10.2307/1310951>

23. Ledig F.T. Human Impacts on Genetic Diversity in Forest Ecosystems. *Oikos*, 1992, vol. 63, no. 1, p. 87. <https://doi.org/10.2307/3545518>

24. Lewandowski A., Kowalczyk J., Litkowiec M., Urbaniak L., Rzońca M. Selection of Elite Mother Trees of Scots Pine, and European Larch to Establish 1.5 Generation Seed Orchards. *Sylwan*, 2017, vol. 161, no. 11, pp. 917–926. (In Polish).

25. Lindgren D., Prescher F. Optimal Clone Number for Seed Orchards with Tested Clones. *Silvae Genetica*, 2005, vol. 54, no. 1-6, pp. 80–92. <https://doi.org/10.1515/sg-2005-0013>
26. Lundkvist K. Genetic Structure in Natural and Cultivated Forest Tree Populations. *Silva Fennica*, 1982, vol. 16, pp. 141–149.
27. Muller-Starck G. Protection of Genetic Variability in Forest Trees. *Forest Genetics*, 1995, vol. 2, pp. 121–124.
28. Namkoong G. Biodiversity – Issues in Genetics, Forestry and Ethics. *Forestry Chronicle*, 1992, vol. 68, no. 4, pp. 438–443. <https://doi.org/10.5558/tfc68438-4>
29. Nardin M., Musch B., Rousselle Y., Guerin V., Sanchez L., Rossi J-P., Gerber S., Marin S., Paques L.E., Rozenberg P. Genetic Differentiation of European Larch Along an Altitudinal Gradient in the French Alps. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, no. 5, pp. 517–527. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0483-8>
30. Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6.5: Genetic Analysis in Excel. Population Genetic Software for Teaching and Research – an Update. *Bioinformatics*, 2012, vol. 28, no. 19, pp. 2537–2539. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
31. Soranzo N., Provan J., Powell W. Characterization of Microsatellite Loci in *Pinus sylvestris* L. *Molecular Ecology*, 1998, vol. 7, no. 9, pp. 1260–1261.
32. Stoehr M.U., El-Kassaby Y.A. Levels of Genetic Diversity at Different Stages of the Domestication Cycle of Interior Spruce in British Columbia. *Theoretical and Applied Genetics*, 1997, vol. 94, no. 1, pp. 83–90. <https://doi.org/10.1007/s001220050385>
33. Van Oosterhout C., Hutchinson W., Wills D., Shipley P. Micro-Checker: Software for Identifying and Correcting Genotyping Errors in Microsatellite Data. *Molecular Ecology Notes*, 2004, vol. 4, no. 3, pp. 535–538. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00684.x>
34. Wójkiewicz B., Litkowiec M., Wachowiak W. Contrasting Patterns of Genetic Variation in Core and Peripheral Populations of Highly Outcrossing and Wind Pollinated Forest Tree Species. *AoB Plants*, 2016, vol. 8, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plw054>

**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\*411

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-69-83

## Применение *Ooencyrtus kuvanae* Howard против непарного шелкопряда

Ю.А. Сергеева<sup>✉</sup>, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [AAC-4718-2020](https://orcid.org/0000-0002-6597-029X),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6597-029X>

С.О. Долмонево, руководитель группы вирусных технологий;  
Researcher ID: [AAQ-9259-2021](https://orcid.org/0000-0002-0054-4572), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0054-4572>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия, 141202; [sergeeva.vniilm@gmail.com](mailto:sergeeva.vniilm@gmail.com)<sup>✉</sup>, [dolmonego@vniilm.ru](mailto:dolmonego@vniilm.ru)

Поступила в редакцию 23.03.21 / Одобрена после рецензирования 26.06.21 / Принята к печати 28.06.21

**Аннотация.** Непарный шелкопряд *Lymantria dispar* – один из наиболее широко распространенных насекомых-вредителей на территории РФ. В европейской части России на яйцах *L. dispar* паразитируют *Anastatus japonicus* Ashmead и *Ooencyrtus kuvanae* Howard, интродуцированный в 1988 г. из Северной Кореи. Для ограничения численности непарного шелкопряда с помощью яйцеедов *O. kuvanae* требуется определить нормы их выпуска и эффективность, как для профилактики возникновения, так и для оценки возможности ликвидации очагов вредителя. Опытный выпуск яйцеедов *O. kuvanae* (237,5 тыс. особей) выполнен в 2019 г. в Оренбургской области в очагах непарного шелкопряда, которые охватывали пойму р. Урал на территории 3 лесничеств. Среднее число кладок на дерево на участках выпуска оэнциртуса варьировало от 1 до 20. Учет эффективности был проведен через 48–52 дня после выпуска, в период отрождения 3-го поколения *O. kuvanae*. Осуществлены сбор кладок и их лабораторный анализ. Эффективность выпусков составила до 82,9–90,3 % на участках с плотностью 107–268 тыс. яиц *L. dispar* на 1 га и не превышала 47,3 % на участках с плотностью вредителя 3800 тыс. яиц/га. На основе соотношения выпущенных на 1 га яйцеедов и абсолютной численности уничтоженных яиц *L. dispar* предложен коэффициент для расчета оптимального количества выпуска *O. kuvanae* на 1 га. Применение *O. kuvanae* для регулирования численности непарного шелкопряда следует планировать в начале формирования его очагов. Использование энтомофага в действующих очагах массового размножения непарного шелкопряда при средней численности более 1,5 кладок на дерево не позволяет снизить запас фитофага до хозяйственно неопасного уровня. Возможно применять *O. kuvanae* в системе интегрированных профилактических мероприятий: снизить численность непарного шелкопряда истребительными обработками химическими или биологическими инсектицидами и затем приступить к выпуску энтомофагов.

**Ключевые слова:** защита леса, биологическая защита растений, непарный шелкопряд, яйцееды, оэнциртус, анастатус, эффективность выпуска яйцеда, норма выпуска яйцеда, Оренбургская область

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансировании Федеральным агентством лесного хозяйства (Рослесхоз) в рамках государственного задания ФБУ ВНИИЛМ на 2019 г. по теме «Разработка технологии массового разведения и применения яйцеедов для защиты леса от шелкопрядов непарного и монашенки»



(AAAA-A17-117041010010-8). Авторы признательны специалистам Министерства лесного и охотничьего хозяйства Оренбургской области и Оренбургского филиала ФБУ «Рослесозащита» за помощь в организации полевых исследований.

**Для цитирования:** Сергеева Ю.А., Долмонево С.О. Применение *Ooencyrtus kuvanae* Howard против непарного шелкопряда // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 69–83. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-69-83>

Original article

### Application of *Ooencyrtus kuvanae* Howard Against Gypsy Moth

**Yuliya A. Sergeeva**<sup>✉</sup>, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

Researcher ID: [AAC-4718-2020](https://orcid.org/0000-0002-6597-029X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6597-029X>

**Sergey O. Dolmonego**, Head of Virus Technologies Group;

Researcher ID: [AAQ-9259-2021](https://orcid.org/0000-0002-0054-4572), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0054-4572>

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (FBU VNIILM), ul. Institutskaya, 15, Pushkino, Moscow region, 141202, Russian Federation; [sergeeva.vniilm@gmail.com](mailto:sergeeva.vniilm@gmail.com)<sup>✉</sup>, [dolmonego@vniilm.ru](mailto:dolmonego@vniilm.ru)

Received on March 23, 2021 / Approved after reviewing on June 26, 2021 / Accepted on June 28, 2021

**Abstract.** The gypsy moth, *Lymantria dispar*, is one of the most widespread pest-insects in the Russian Federation. *Anastatus japonicus* Ashmead and *Ooencyrtus kuvanae* Howard are parasites that live on the eggs of *L. dispar*. They can be found in the European part of Russia, where the insects were imported from North Korea in 1988. The usage of *O. kuvanae* to limit the gypsy moth populations requires recognition of the release rates and effectiveness in preventing mass pest outbreaks, as well as for the evaluation of the possibility of elimination. An experimental release of *O. kuvanae* (237 500 specimens) was conducted in 2019 during a gypsy moth outbreak in the Orenburg region, which covered the basin of the Ural River within the territory of three forestries. The average number of clutches of *O. kuvanae* varied from 1 to 20 clutches per tree. The control of efficiency was made 48–52 after the release, during the incubation period of the 3ed generation of *O. kuvanae*. The clutches were collected and experimentally analyzed. The release rate of *L. dispar* ranged 82.9–90.3 % at the locations with a density of 107–268 thousand eggs/ha and did not exceed 47.3 % at the locations with a density of 3800 thousand eggs/ha. A coefficient for estimation of the optimal number of *O. kuvanae* specimens per 1 ha was proposed based on the proportion of the released egg parasitoids per 1 ha and the absolute number of the destroyed eggs of *L. dispar*. The regulation of the gypsy moth's population by *O. kuvanae* should be done at the biggening of the foci formation. The usage of the entomophage in the active reproductive foci of the gypsy moth, with an infestation rate higher than 1.5 clutches per tree, cannot reduce the phytophage numbers to a harmless level. The application of *O. kuvanae* can be a part of an integrated system of preventive measures: chemical or biological pesticide treatments to reduce gypsy moth populations, and after initiate the release of the entomophages.

**Keywords:** forest protection, biological protection of plants, gypsy moth, egg parasitoid, *Ooencyrtus kuvanae*, *Anastatus japonicus* Ashmead, egg parasitoid release efficiency, egg parasitoid release rate, Orenburg region

**Acknowledgments:** The study was funded by the Federal Forestry Agency (Rosleskhoz) as part of the federal assignment of the FBU VNIILM for 2019 on "Development of a Technology for Mass Breeding and the Use of Egg Parasitoid to Protect Forests from Gypsy and Nun



Silkworms" (AAAA-A17-117041010010-8). The authors are grateful to the specialists of the Ministry of Forestry and Hunting of the Orenburg region and the Orenburg branch of the Federal State Institution "Roslesozashchita" for assistance in the organization of field studies.

**For citation:** Sergeeva Yu.A., Dolmonego S.O. Application of *Ooencyrtus kuvanae* Howard Against Gypsy Moth. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 69–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-69-83>

### Введение

Использование в практике защиты леса энтомофагов согласуется со сложившейся в мире концепцией перехода к использованию экологически безопасных средств борьбы с вредными организмами и позволяет предотвращать ущерб от насекомых-вредителей без отрицательного влияния на другие компоненты лесных экосистем. Биологическая защита растений с применением яйцеедов представляет наибольший интерес, поскольку обеспечивает подавление самой ранней стадии развития вредителя (в фазе яйца), исключая отрождение личинок или гусениц фитофага, и, следовательно, объедание древостоев [13]. Непарный шелкопряд *Lymantria dispar* (Linnaeus, 1758; Lepidoptera: Erebidae) – один из наиболее широко распространенных вредителей на территории РФ, очаги его массового размножения отмечались в 52 субъектах страны [11]. По данным ежегодных обзоров санитарного и лесопатологического состояния лесов в Российской Федерации Рослесозащиты, минимальная площадь очагов по стране – 200 тыс. га; площадь очагов, превышающая 1 млн га, регистрировалась в 1977–1978, 1991 и 1994, 1996–1997, 2013–2015 гг. Высказаны предположения, что в результате процессов климатических изменений в ближайшие годы может начаться процесс расширения ареалов непарного шелкопряда и зона его воздействия существенно расширится [15].

Наиболее значимыми для динамики численности непарного шелкопряда видами яйцеедов являются анастатус *Anastatus japonicus* (Ashmead, 1904; Hymenoptera: Eupelmidae) и оэнциртус *Ooencyrtus kuvanae* (Howard, 1910; Hymenoptera: Encyrtidae) [20]. *A. japonicus* аборигенно обитает в европейской части России, северная граница зоны его распространения проходит по условной линии, соединяющей города Брянск, Орел, Липецк, Тамбов, Пензу, Самару и Оренбург. Особенности биологии анастатуса (развивается в 1 поколении в год, плодовитость – 40–60 яиц, короткий период заражения эмбриональной стадии яиц, низкая расселительная способность – несколько метров в год) и инертность на изменение плотности популяции хозяина [10, 12] не позволяют использовать этот вид для ограничения численности непарного шелкопряда в России. Однако есть успешный пример применения *A. japonicus* в программах защиты садов личи [23].

В 1987 г. в России из Северной Кореи интродуцирован яйцеед *O. kuvanae* (Howard, 1910; Hymenoptera: Encyrtidae). Паразитоид был размножен в отделе био-метода Всероссийского центра карантина растений, и в период с 1988 по 1994 г. его акклиматизировали на территории ряда республик и областей бывшего СССР. Эффективность в местах расселения оказалась различной, максимальная – в Грузии (90–95 %), Новороссийске (92 %) и Молдавии (70 %), отмечена перезимовка



оэнциртуса в Москве [6, 7]. В ряде стран, куда ранее интродуцировали *O. kuvanae*, его эффективность в местах обитания составляла 10–60 % [16–19, 22, 24]. В России через 20 лет после интродукции оэнциртуса отмечена его существенная роль в динамике численности непарного шелкопряда в Краснодарском крае, где при низкой плотности фитофага зараженность яиц достигала 57,5–91,6 % [2, 8]. В наружном слое кладок паразитировано 17,6–36,5 % яиц, в 3-м и 4-м слоях кладок паразитоиды отсутствовали [8].

Целью работы является оценка возможности использования яйцеда *O. kuvanae* для ограничения численности непарного шелкопряда, как для профилактики возникновения очагов вредителя, так и для оценки возможности их ликвидации. В этой связи необходимо определить нормы выпуска и эффективность яйцеда при разных уровнях плотности популяции непарного шелкопряда.

Проведение профилактических мероприятий регламентировано п. 18 «Правил ликвидации очагов вредных организмов» (приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 09.11.2020 г. № 913): «Мероприятия по уничтожению или подавлению численности вредных организмов производятся следующими методами: <...> з) выпуск энтомофагов»; и п. 18 подп. б «Правил осуществления мероприятий по предупреждению распространения вредных организмов» (приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 09.11.2020 г. № 912): «Профилактическими биотехническими мероприятиями являются: охрана местообитаний, выпуск, расселение и интродукция насекомых-энтомофагов». Применение интродуцированного энтомофага *O. kuvanae* согласуется с подходом Европейско-средиземноморской организации по защите растений к использованию агентов биологической борьбы [14]. В соответствии со стандартом [21], *O. kuvanae* включен в «Позитивный перечень», т. е. безопасность его использования против непарного шелкопряда считается доказанной.

#### Объекты и методы исследования

Для выполнения опытных работ по применению *O. kuvanae* проведена лабораторная наработка его культуры (237,5 тыс. особей). Опытный выпуск яйцедов осуществлен в 2019 г. в Оренбургской области в очагах непарного шелкопряда, которые охватывали пойму р. Урал на территории Краснохолмского, Илекского и Ташлинского лесничеств. Заселенность древостоев непарным шелкопрядом была неравномерная.

До начала выпуска *O. kuvanae* в природу на опытных участках выборочно собраны кладки вредителя для лабораторного анализа их зараженности естественными популяциями энтомофагов. Кладки непарного шелкопряда (20 шт.) с каждого участка смешивали, очищали от пушка, случайной выборкой отбирали 3 пробы по 100 яиц и просматривали их под биноклем.

Выпуск оэнциртуса в очагах непарного шелкопряда проведен 23–28 июля, в период откладки яиц бабочками фитофага. Работы выполнены в первой половине дня, в теплую ясную безветренную погоду. Равномерное расселение по ходовым линиям осуществлено по диагонали участка – рядом с деревьями с кладками высыпаются зараженные яйца и вытряхнуто имаго яйцедов.

Учет эффективности выполнен 16 и 17 сентября, т. е. через 48–52 дня после выпуска. На опытных участках осмотр деревьев, подсчет и сбор кладок проводили по неповешенной ходовой линии, расположенной по мысленной диагонали древостоя, расстояние между осматриваемыми деревьями – 2–5 м, или осмотр проводили через каждые 2–3 дерева. Для определения необходимой выборки руководствовались широко используемыми рекомендациями [1, 3, 4]. Ошибка выборки составляет не более 15 %.

Для оценки зараженности оэнциртусом кладок вредителя их разделяли на неповрежденные и поврежденные яйцеедом. Это возможно установить визуально – по характерным вылетным отверстиям оэнциртуса. Одновременно осуществлен подсчет числа яиц в кладках.

Выполнен лабораторный анализ собранных яиц. Кладки яиц с одного учетного пункта помещали в отдельный пакет и этикетировали. Долю уничтоженных энтомофагами яиц выявляли для выборок со всех участков. Каждую выборку перемешивали, разрушая кладки, помещали в мешок из мелкоячеистой ткани и очищали от пушка с помощью пылесоса. Очищенные яйца взвешивали, отсчитывали 3 раза по 100 яиц из общей массы и снова взвешивали. Устанавливали средний вес 100 яиц по 3 навескам, общее число яиц в выборке и среднее число яиц в кладке для каждого участка. Затем брали 3 навески из 1000 яиц с каждого учетного пункта.

Каждую выборку по 1000 яиц анализировали под биноклем, определяя число здоровых яиц (с гусеницей внутри); яиц, из которых вылетели яйцееды (оэнциртус); в которых находится личинка или куколка оэнциртуса; погибших и высохших (в результате дополнительного питания самок оэнциртуса); неоплодотворенных; в которых находится личинка аборигенного яйцееда *Anastatus japonicus* (яйцо, зараженное анастатусом, легко отличить от зараженного оэнциртусом по темным крапчатым включениям на оболочке яйца). Данные по 3 выборкам усредняли и получали процент уничтоженных оэнциртусом яиц на учетном пункте.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Среднее число кладок вредителя на дерево на участках выпуска оэнциртуса варьировало от 1 до 20, что дало возможность провести исследования, направленные на определение эффективных норм выпуска энтомофагов при разной численности вредителя (табл. 1).

Анализ яиц непарного шелкопряда перед выпуском яйцеедов показал зараженность яиц фитофага аборигенным яйцеедом анастатусом (табл. 2). Доля паразитированных анастатусом яиц составляла порядка 1–3 %.

Результаты оценки встречаемости кладок непарного шелкопряда с вылетными отверстиями оэнциртуса в местах его расселения через 48–52 дня после выпуска приведены в табл. 3.

В Кардаиловском и Краснохолмском участковых лесничествах в кварталах 48 и 110 при низкой численности непарного шелкопряда эффективность выпусков оэнциртуса по доле зараженных кладок составила порядка 80 %. При этом большинство кладок (от числа зараженных – 91,7 %) были полностью уничтожены яйцеедом.

Таблица 1

**Объемы выпуска яйцеда *Ooencyrtus kuvanae* в Оренбургской области**  
**Release volumes of the egg parasitoid *Ooencyrtus kuvanae* in the Orenburg region**

Квартал/выдел	Площадь, га	Среднее число кладок непарного шелкопряда на дерево, шт.	Выпущено яйцедов, шт.	
			на участок	в среднем на 1 га
<i>Краснохолмское лесничество</i>				
<i>Кардашловское участковое лесничество</i>				
48/2	11,0	1,0	4500	409
48/6	3,6	2,0	5000	1389
59/1	21,0			238
<i>Краснохолмское участковое лесничество</i>				
110/62	5,6	1,0	5000	893
111/29	1,0	2,0		790
111/19	1,3			
111/6	23,0	2,5	10 000	
<i>Городищенское участковое лесничество</i>				
192/8	4,9	2,0	6000	1224
<i>Илекское лесничество</i>				
<i>Илекское участковое лесничество</i>				
113/7	4,9	20,0	21 000	4285
113/5, 6, 9, 10, 18	10,9	12,0	8000	734
372/6	6,7	15,0	8000	1194
<i>Ташлинское лесничество</i>				
<i>Кинделинское участковое лесничество</i>				
16/12	12,0	9,1	5000	417
16/27	3,1		10 000	
17/34	3,4	2941		
17/43	6,6	1515		
76/17	6,0	5,8	4000	666
80/4	9,1	9,6	20 000	2198
21/40	11,0	10,7	20 000	1818
33/16	4,0	10,4	6000	1500
85/2, 3	14,1	8,5	10 000	709
25/34	5,1	10,1	15 000	2941
22/17	8,5	10,5	10 000	1176
87/7	25,0	10,0		400
114/9	6,2	6,2		1612
70/11	7,3	5,0		1370
<i>Ташлинское участковое лесничество</i>				
95/19	7,8	4,0	5000	641

Таблица 2

**Результаты анализа кладок яиц непарного шелкопряда в Оренбургской области  
(до выпуска *O. kuvanae*)**  
**Results of analysis of gypsy moth egg clutches from the Orenburg region  
(before the release of *O. kuvanae*)**

Место сбора кладок (участковое лесничество/квартал/выдел)	Доля яиц, %		
	здоровых	неоплодотворенных и погибших	паразитированных анастатусом
Кардаиловское/48/2	95	2	3
Краснохолмское/111/29	97	1	2
Илекское/113/7		2	1
Кинделинское/16/12	95	3	2
Кинделинское/17/34	96		1

Таблица 3

**Встречаемость кладок непарного шелкопряда, паразитированных яйцеедом  
*O. kuvanae*, в Оренбургской области**  
**Occurrence of parasitized clutches of gypsy moth by egg parasitoid *O. kuvanae*  
in the Orenburg region**

№	Квартал/выдел	Среднее число яиц в кладке	Число проанализированных кладок	Доля зараженных кладок, %
			шт.	
<i>Краснохолмское лесничество</i>				
<i>Кардаиловское участковое лесничество</i>				
1	48/2	214	71	84,5
2	48/6	268	36	77,8
3	59/1	285	81	35,8
<i>Краснохолмское участковое лесничество</i>				
4	110/62	263	30	76,7
5	111/6, 19, 29	324	121	30,6
<i>Илекское лесничество</i>				
<i>Илекское участковое лесничество</i>				
6	113/7	475	405	30,3
7	3/5, 6, 9, 10, 18	412	289	19,0
8	372/6	422	197	14,7
<i>Ташлинское лесничество</i>				
<i>Кинделинское участковое лесничество</i>				
9	16/12	290	437	12,2
10	16/27	308	41	35,5
11	17/34, 43	450	480	32,9
12	76/17	353	55	14,4
13	80/4	433	60	11,6

Окончание табл. 3

№	Квартал/выдел	Среднее число яиц в кладке	Число проанализированных кладок	Доля зараженных кладок, %
			шт.	
14	21/40	389	36	16,7
15	33/16	386	12	8,3
16	85/2, 3	402		
17	25/34	463	282	18,4
18	22/17	449	12	16,7
19	87/7	374		25,0
20	114/9	357		16,0
21	70/11	314	15	25,0
<i>Ташлинское участковое лесничество</i>				
22	95/19	295	20	35,0

При сроке развития яйцеда в лаборатории 21–23 дн. (возможно, в природе несколько дольше) в ходе опыта должно было реализоваться 2-е поколение и начать отрождаться 3-е. Судя по состоянию кладок, их большая доля оказалась зараженной 1-м поколением яйцеда. Следует отметить, что кладки разрушены в результате деятельности личинок жуков малашек (семейство: Melyridae, подсемейство: Malachiinae). Предположительно, деятельность личинок жуков позволила имаго оэнциртуса заразить все слои кладок. В ряде работ [5, 9] жуки малашки указаны в качестве хищников по отношению к яйцам непарного шелкопряда. Однако в лабораторных условиях нами установлено, что личинки не питаются яйцами этого фитофага, возможно, они используют кладки непарного шелкопряда в качестве укрытий.

В квартале 59 Кардаиловского участкового лесничества при расселении 5 тыс. яйцеедов на 21 га при средней численности кладок 2 шт./дер. 35 % кладок были паразитированы. В квартале 111 Краснохолмского участкового лесничества (2–2,5 кладки на дерево) расселение 20 тыс. особей на 31 га показало 30 % зараженных кладок.

В Илекском участковом лесничестве эффективность применения яйцеда при высокой численности кладок вредителя (20 шт./дер.) составила при выпуске 4 тыс. особей на 1 га 30 % зараженных кладок. На 2 других участках уменьшение нормы выпуска до 1 тыс. яйцеедов на 1 га (при сопоставимой численности вредителя) показало встречаемость зараженных кладок в 15–19 % случаев. При проведении учетов повсеместно отмечено наличие имаго яйцеедов на кладках. То есть произошло отрождение 3-го поколения энтомофагов, и при благоприятных погодных условиях их деятельность продолжалась.

В Ташлинском лесничестве расселение оэнциртуса проведено на площади 129 га, выпущено 155 тыс. особей. Эффективность выпуска по зараженным кладкам при численности порядка 10 кладок непарного шелкопряда на дерево составила 8,3–35,5 %.

Результаты лабораторного анализа кладок яиц непарного шелкопряда, собранных в местах выпуска яйцеедов, приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты лабораторного анализа кладок непарного шелкопряда  
в местах выпуска *O. kuvanae*  
Results of laboratory analysis of gypsy moth clutches in the release locations  
of *O. kuvanae***

Квартал/выдел	Доля яиц, %					
	здоровых	паразитированных оэнциртусом		погибших	неоплодот- воренных	зараженных анастатусом
		вылетели имаго	личинка или куколка в яйце			
<i>Краснохолмское лесничество</i>						
<i>Кардаиловское участковое лесничество</i>						
48/2	5,2	74,9	8,0	7,4	1,8	2,7
48/6	14,6	67,8	8,7	6,0	1,4	1,5
59/1	68,4	22,3	4,3	3,0	1,0	1,0
<i>Краснохолмское участковое лесничество</i>						
110/62	13,8	65,6	9,2	8,1	1,4	1,9
111/6, 19, 29	46,9	36,0	7,4	5,8	1,6	2,3
<i>Илекское лесничество</i>						
<i>Илекское участковое лесничество</i>						
113/7	49,9	37,1	7,1	3,1	1,7	1,1
113/5, 6, 9, 10, 18	80,5	12,1	2,9	1,8	1,0	1,7
372/6	79,1	11,0	3,8	2,0	2,4	
<i>Ташлинское лесничество</i>						
<i>Кинделинское участковое лесничество</i>						
16/12	80,4	7,9	3,7	3,2	2,6	2,2
16/27	57,9	27,2	5,5	4,0	3,3	2,1
17/34, 43	63,0	21,3	6,8	4,6	2,9	1,4
76/17	80,5	8,8	3,9	2,9	2,1	1,8
80/4	80,2	7,4	4,1	2,2	5,1	1,0
21/40	75,1	10,2	6,7	3,3	2,1	2,6
33/16	77,0	11,4	5,9	2,2	1,8	1,7
85/2, 3	74,6	9,3	7,4	2,9	2,6	3,2
25/34	75,6	12,3	4,4	2,8		2,3
22/17	77,9	12,0	3,5	1,5	1,9	3,2
87/7	67,6	18,4	6,1	2,2	2,9	2,8
114/9	70,3	12,1	8,7	4,1	2,4	2,4
70/11	68,2	16,3	5,2	5,0	2,2	3,1
<i>Ташлинское участковое лесничество</i>						
95/19	44,9	36,7	7,8	4,8	1,9	3,9

На основе полученных данных о зараженности яиц в выборках и в соответствии с запасом яиц вредителя по каждому опытному участку получены данные по эффективности *O. kuvanae*, а также соотношение числа выпущенных яйцеедов и общей численности яиц непарного шелкопряда на 1 га (рассчита-

но как произведение числа кладок на дерево, числа яиц в кладке и количества стволов на 1 га) и вычислено отношение числа уничтоженных яиц непарного шелкопряда к 1 особи энтомофага на опытных участках (табл. 5).

Таблица 5

**Результаты эффективности *O. kuvanae* против непарного шелкопряда  
в Оренбургской области**  
**Results of the effectiveness of *O. kuvanae* against the gypsy moth in the Orenburg  
region**

Квартал/выдел	Число яиц непарного шелкопряда	Погибло яиц	Эффективность выпуска, %	Число яиц непарного шелкопряда, уничтоженных 1 яйцеедом, шт.
	на 1 га, тыс. шт.			
<i>Краснохолмское лесничество</i>				
<i>Кардаилловское участковое лесничество</i>				
48/2	107,0	96,6	90,3	236
48/6	268,0	221,1	82,5	159
59/1	285,0	84,4	29,6	354
<i>Краснохолмское участковое лесничество</i>				
110/62	157,8	130,8	82,9	147
111/6, 19, 29	349,9	172,2	49,2	218
<i>Илекское лесничество</i>				
<i>Илекское участковое лесничество</i>				
113/7	3800,0	1797,4	47,3	419
113/5, 6, 9, 10, 18	1977,6	332,2	16,8	453
372/6	2532,0	425,4		356
<i>Ташлинское лесничество</i>				
<i>Кинделинское участковое лесничество</i>				
16/12	1319,5	195,3	14,8	469
16/27	1401,0	514,2	36,7	159
17/34, 43	2835,0	927,1	32,7	464
76/17	1023,7	159,7	15,6	240
80/4	2078,4	284,7	13,7	130
21/40	2081,1	420,4	20,2	231
33/16	2007,2	391,4	19,5	261
85/2, 3	1708,5	334,9	19,6	472
25/34	2338,2	455,9	19,5	155
22/17	2357,3	400,7	17,0	341
87/7	499,3	133,3	26,7	333
114/9	1106,7	275,6	24,9	171
70/11	785,0	208,0	26,5	152
<i>Ташлинское участковое лесничество</i>				
95/19	590,0	290,9	49,3	454



На графике рис. 1 показана зависимость эффективности применения яйцеда от количества яиц насекомого-хозяина, приходящихся на 1 *O. kuvanae*.

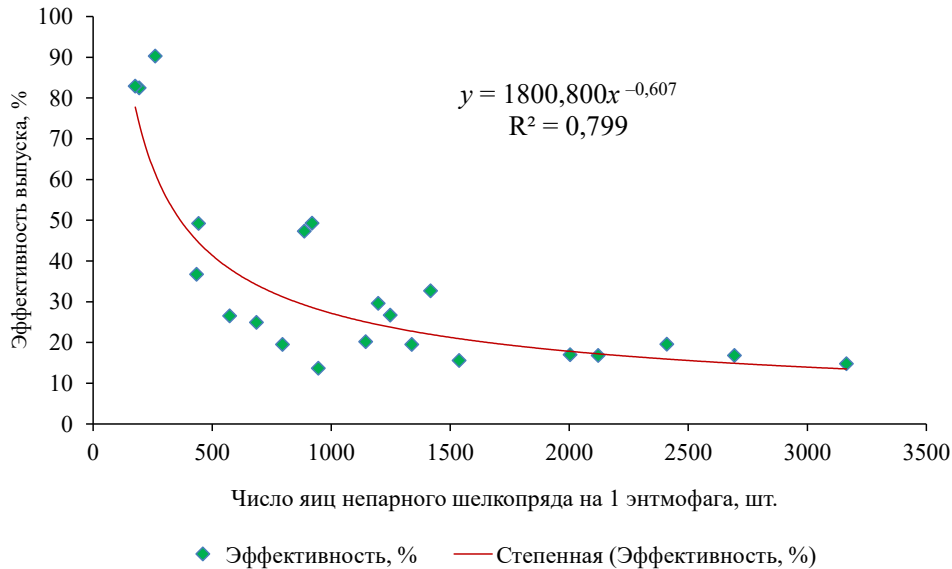


Рис. 1. Эффективность выпуска *O. kuvanae* при разной численности непарного шелкопряда  
Fig. 1. Release efficiency of *O. kuvanae* with different amounts of gypsy moth

Полученные результаты еще раз подтверждают целесообразность применения биологического средства защиты леса на основе оэнциртуса при низкой численности насекомого-хозяина. В противном случае необходимо существенно увеличивать норму расхода яйцеда.

Анализ абсолютной численности оэнциртуса в насаждении показывает, что за 2 поколения количество яйцеедов в насаждениях возрастает в 200–400 раз. Так, при численности непарного шелкопряда (в квартале 113, выделе 7 Илекского лесничества) 20 кладок/га было выпущено более 4 тыс. особей, эффективность составила 47,3 %, в результате число яйцеедов на 1 га древостоя на момент проведения учетов составляло порядка 1,7 млн особей.

Соотношение выпущенных на 1 га яйцеедов и их абсолютной численности, рассчитанной по результатам анализа яйцекладок непарного шелкопряда, показало, что число уничтоженных яиц фитофага в среднем составляет 290 шт. (минимально – 130, максимально – 472), и это постоянная величина – константа при  $R^2 = 0,0115$  (рис. 2).

В соответствии с методическим руководством [12], оптимальное количество *O. kuvanae*, необходимое для расселения на определенной территории, рассчитывается по формуле

$$x = \frac{apc}{50},$$

где  $a$  – среднее число яйцекладок непарного шелкопряда на ствол дерева;  $p$  – среднее число яиц в яйцекладке;  $c$  – число стволов на 1 га.



Рис. 2. Средняя эффективность 1 особи *O. kuvanae* при разных уровнях численности вредителя и эффективности применения яйцееда (номер участка соответствует номеру в табл. 3)

Fig. 2. Average efficiency of an individual *O. kuvanae* at different levels of infestation and application efficiency of the egg parasitoid (the trail plot number corresponds to the number in Table 3)

В соответствии с расчетом нормы выпуска оэнциртуса по этой формуле, например, в квартале 48 выделе 2 Кардаиловского участкового лесничества требуется 2 тыс. особей на 1 га. Однако в результате экспериментальных полевых работ установлено, что выпуск лишь 409 особей на 1 га обеспечил за 2 поколения эффективность 90,3 %.

Исходя из полученных данных и полученной линии тренда диаграммы (рис. 2), для ряда «число зараженных яиц на 1 яйцееда» установлен коэффициент, который предлагаем использовать при расчете оптимального количества выпуска яйцеедов на 1 га, если в зоне выпуска возможно развитие как минимум 2 поколений энтомофага:

$$x = \frac{arc}{250}.$$

### Заключение

Выпуски *Ooencyrtus kuvanae* для регулирования численности непарного шелкопряда следует планировать в самом начале формирования его очагов. В программе успешного применения яйцееда в лесах юга и центрально-черноземной зоны России следует вести тщательный лесопатологический надзор за непарным шелкопрядом с обязательным анализом его яйцекладок. При достижении численности кладок уровня 0,1–0,3 кладки на 1 дерево в конкретной популяции и отсутствии природного паразитизма яиц или если он не пре-

вышает нескольких процентов, следует планировать на ближайшие 2–3 года выполнение профилактических работ по выпуску выращенного в лаборатории оэнциртуса.

Использование энтомофагов в действующих очагах массового размножения непарного шелкопряда при средней численности кладок на дерево более 1,5 не позволяет снизить запас фитофага до хозяйственно неопасного уровня. Возможно применять *O. kuvanae* в системе интегрированных профилактических мероприятий, снижая численность непарного шелкопряда истребительными обработками химическими или биологическими инсектицидами и только потом приступая к выпуску энтомофагов. Против непарного шелкопряда применение оэнциртуса целесообразно в районах, где отсутствует аборигенно обитающий *Anastatus japonicus* или его эффективность не превышает 20 %. При назначении профилактических мер с использованием *O. kuvanae* необходимо учитывать показатели зараженности кладок непарного шелкопряда яйцеедом *A. japonicus*.

Использование яйцеедов в лесозащитной практике позволит расширить ассортимент биологических средств защиты леса на основе энтомофагов и обеспечит его надежную защиту от формирующихся очагов непарного шелкопряда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воронцов А.И., Голубев А.В., Мозолева Е.Г. Наставления по надзору, учету и прогнозу хвое- и листогрызущих насекомых в европейской части РСФСР / Минлесхоз РСФСР. М., 1988. 84 с.

Vorontsov A.I., Golubev A.V., Mozolevskaya E.G. *Regulations on Supervision, Registration and Forecasting of Needle- and Leaf-Eating Insects in the European Part of the RSFSR*. Moscow, Ministry of Forestry of the RSFSR Publ., 1988. 84 p. (In Russ.).

2. Гниненко Ю.И., Щуров В.И., Серый Г.А. Новая вспышка численности непарного шелкопряда *Lymantria dispar* (LINNAEUS, 1758) в лесах западной части Северного Кавказа // Изв. СПбЛТА. 2010. № 192. С. 59–64.

Gninenko Yu.I., Shchurov V.I., Seryi G.A. New Outbreak of Gypsy Moth *Lymantria dispar* (LINNAEUS, 1758) in the Forests of the Western Part of the North Caucasus. *Izvestiya SPbFTU*, 2010, no. 192, pp. 59–64. (In Russ.).

3. Знаменский В.С., Лямцев Н.И., Новикова Е.П. Рекомендации по надзору за непарным шелкопрядом. М.: ВНИИЛМ, 1982. 45 с.

Znamensky V.S., Lyamtsev N.I., Novikova E.P. *Recommendations on Supervision of Gypsy Moths*. Moscow, VNIILM Publ., 1982. 45 p. (In Russ.).

4. Знаменский В.С., Лямцев Н.И., Новикова Е.Н. Методическое руководство по надзору за главнейшими листогрызущими вредителями дубрав. М.: ВНИИЛМ, 1986. 62 с.

Znamensky V.S., Lyamtsev N.I., Novikova E.P. *Manual on Supervision of the Main Leaf-Eating Pests of Oak Forests*. Moscow, VNIILM Publ., 1986. 62 p. (In Russ.).

5. Иванцова Е.А., Вострикова Ю.В. Энтомофаги непарного шелкопряда в лесоаграрных ландшафтах Нижнего Поволжья // Науч. альм. 2015. № 7(9). С. 970–973.

Ivancova E.A., Vostrikova Yu.V. *The Natural Enemies of the Gypsy Moth in the Forest-Agrarian Landscapes of the Lower Volga Region*. *Nauchnyj al'manah = Science Almanac*, 2015, no. 7(9), pp. 970–973. (In Russ.). <https://doi.org/10.17117/na.2015.07.970>

6. Ижевский С.С., Волков О.Г. Расселение оэнциртуса – интродуцированного яйцееда непарного шелкопряда в России и других странах СНГ // Лесоведение. 1995. № 1. С. 88–92.

Izhevskij S.S., Volkov O.G. Distribution of *Ooencyrtus* – an Introduced Gypsy Moth's Egg Parasite in Russia and Other CIS Countries. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1995, no. 1, pp. 88–92. (In Russ.).

7. Ижевский С.С., Волков О.Г., Зеленов Н.Н., Тряпицын В.А. Успешная интродукция в Россию паразита непарного шелкопряда – ооэнциртуса *Ooencyrtus kuvanae* (How.) // Защита и карантин растений. 2010. № 6. С. 42–45.

Izhevskij S.S., Volkov O.G., Zelenev N.N., Tryapitsyn V.A. Successful Introduction to Russia of the Gypsy Moth Parasite *Ooencyrtus kuvanae* (How.). *Zashchita i karantin rasteniy*, 2010, no. 6, pp. 42–45. (In Russ.).

8. Кобзарь В.Ф., Данилов Р.Ю., Кобзарь М.И. Непарный шелкопряд *Lymantria dispar* (L.) в Краснодарском крае: мониторинг и прогнозирование изменения плотности популяции // Изв. СПбЛТА. 2012. № 200. С. 42–50.

Kobzar V.F., Danilov R.Yu., Kobzar M.I. Gypsy Moth *Lymantria dispar* (L.) in the Krasnodar Territory: Monitoring and Forecasting Changes in Population Density. *Izvestiya SPbFTU*, 2012, no. 200, pp. 42–50. (In Russ.).

9. Колыбин В.А., Зелинская Л.М. Эколого-физиологические особенности популяции непарного шелкопряда (*Porthetria dispar* L.) в Нижнем Приднепровье. Сообщ. II. Паразиты и болезни // Вестн. зоологии. 1971. № 1. С. 26–31.

Kolybin V.A., Zelinskaya L.M. Ecological and Physiological Characteristics of the Gypsy Moth (*Porthetria dispar* L.) in the Lower Dniester Basin. Volume II. Parasites and Diseases. *Vestnik zoologii*, 1971, no. 1, pp. 26–31. (In Russ.).

10. Лямцев Н.И. Роль яйцеда *Anastatus japonicus* в регуляции численности непарного шелкопряда // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике: материалы Всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 18–22 апр. 2016 г. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2016. С. 125–126.

Lyamtsev N.I. Role of Egg Parasite *Anastatus japonicus* in Regulation of Gypsy Moth Population. *Monitoring and Biological Control Methods of Woody Plant Pests and Pathogens: From Theory to Practice. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation, Moscow, 18–22 April 2016*. Krasnoyarsk, KSC SB RAS Publ., 2016. pp. 125–126. (In Russ.).

11. Лямцев Н.И. Прогнозирование массовых размножений непарного шелкопряда, угрозы повреждения дубрав и необходимости защитных мероприятий. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 84 с.

Lyamtsev N.I. *Forecasting Mass Reproduction of Gypsy Moth, Risks for Oak Forests Damaging and Necessity in Prevention Activities*. Pushkino, VNIILM Publ., 2018. 84 p. (In Russ.).

12. Методическое руководство по применению интродуцированного яйцеда оэнциртуса куванэ против непарного шелкопряда. Режим доступа: [http://www.agrozo.ru/base\\_gvc/karantin/document/17.html](http://www.agrozo.ru/base_gvc/karantin/document/17.html) (дата обращения: 05.04.23).

Manual on Application of Introduced Egg Parasitoid *Ooencyrtus kuvanae* Against Gypsy Moth. *Information and Consulting Service of the Agro-Industrial Complex of Russia*. Online source. (In Russ.).

13. Надыкта В.Д., Исмаилов В.Я. Биологическая защита растений и экологическая безопасность. Режим доступа: <https://www.agroxxi.ru/journal/199910/199910006.pdf> (дата обращения: 05.04.23).

Nadykta V.D., Ismailov V.Ya. Biological Plant Protection and Environmental Safety. *Federal Scientific Center for Biological Plant Protection*. Online source. (In Russ.).

14. Орлинский А.Д. Подход ЕОКЗР к оценке агентов биологической борьбы перед их импортом и выпусками в природу // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике: материалы II Всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 22–26 апр. 2019 г. М.; Красноярск: ИЛ СО РАН, 2019. С. 128–129.

Orlinskiy A.D. Approach of EPPO on Evaluation of Biological Control Agents Before Their Import and Release into the Wild. *Monitoring and Biological Control Methods of Woody Plant Pests and Pathogens: From Theory to Practice. Proceedings of the 2ed All-Rus-*

sian Conference with International Participation, Moscow, 22–26 April 2019. Moscow-Krasnoyarsk, KSC SB RAS Publ., 2019, pp. 128–129. (In Russ.).

15. Туткина С.Н., Попов И.О., Семенов С.М., Ясюкевич В.В. Изменение распространения в России и соседних странах непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки (*Lymantria dispar* L. и *Lymantria monacha* L., Lymantriidae, Lepidoptera) под влиянием наблюдаемого и ожидаемого в XXI веке изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2013. Т. 25. С. 375–394.

Titkina S.N., Popov I.O., Semenov S.M., Yasyukevich V.V. Distributional Changes in Russia and Neighboring Countries of Gypsy Moth and Nun Moth (*Lymantria dispar* L. и *Lymantria monacha* L., Lymantriidae, Lepidoptera) Under the Influence of Current and Expected Climate Changes in the 21st Century. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, Moscow, 2013, no. 25, pp. 375–394. (In Russ.).

16. Милановић С., Михажловић Ј. Прилог познавању неких фактора који утичу на ефективност јајних паразитоида губара // Шумарство. 2012. № 1-2. С. 41–47.

Milanović S., Mihajlović J. A Contribution to the Study of Some Factors Which Affect the Effectiveness of the Gypsy Moth Egg Parasitoids. *Shumarstvo*, 2012, no. 1-2, pp. 41–47. (In Serbian).

17. Blackburn L.M., Hajek A.E. *Gypsy Moth Larval Necropsy Guide*. Gen. Tech. Rep. NRS-179. USA, Pennsylvania, Newtown U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2018. 30 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-179>

18. Brown M.W. Literature review of *Ooencyrtus kuvanae* (Hym.: Encyrtidae), an egg parasite of *Lymantria dispar* (Lep.: Lymantriidae). *Entomophaga*, 1984, vol. 29, no. 3, pp. 249–265. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02372112.pdf>

19. Campbell R.W. The Gypsy Moth and Its Natural Enemies. *Agriculture Information Bulletin 381*, USDA Publ., 1975.

20. Crossman S.S. Two Imported Egg Parasites of the Gypsy Moth, *Anastatus bifasciatus* Fonsc. and *Schedius kuvanae* Howard. *Journal of Agricultural Research*, 1925, no. 30, pp. 643–675.

21. EPPO Standards, PM 6/3. *List of Biological Control Agents Widely Used in the EPPO Region*. France, Paris, 2020. 38 p.

22. Fraval A., Villemant G. La lutte biologique contre le bombyx disparate *Porthetria dispar* (L.) (Lep. Lymantriidae) au Maroc. *Proceedings of the Meeting Integrated Protection in Cork-Oak Forests*. Bull. OILB/SROP Publ., 1995, vol. 18, no. 6, pp. 83–86.

23. Li D.-S., Liao C., Zhang B.-X., Song Z.-W. Biological Control of Insect Pests in Litchi Orchards in China. *Biological Control: Theory and Applications in Pest Management*, 2014, vol. 68, pp. 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.06.003>

24. Zúbrik M., Novotný J. Egg Parasitization of *Lymantria dispar* (Lep., Lymantriidae) in Slovakia. *Biologia*, 1997, no. 52(2), pp. 343–350.

**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\*232+630\*174.753

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-84-98

### Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи

Т.Е. Галдина<sup>✉</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAR-5879-2020](https://orcid.org/0000-0002-3573-1570),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3573-1570>

А.И. Чернодубов, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5395-4006>


М.И. Михайлова, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4767-8233>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,  
ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; [tatyana\\_galdina@mail.ru](mailto:tatyana_galdina@mail.ru)<sup>✉</sup>,  
[schaxina.maryu@yandex.ru](mailto:schaxina.maryu@yandex.ru)

Поступила в редакцию 08.04.21 / Одобрена после рецензирования 13.07.21 / Принята к печати 17.07.21

**Аннотация.** Географические культуры сосны обыкновенной в Центральной лесостепи, созданные М.М. Вересеным в 1959 г., стали природной лабораторией для проведения генетико-экологических исследований с целью решения практических вопросов лесосеменного районирования. Изучение внутривидового разнообразия *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи позволяет проследить закономерности формирования культур разного происхождения при различном уровне экологических, генетических и климатических факторов. Представлены результаты многолетних обследований географических культур *P. sylvestris* L. в Центральной лесостепи. Результаты позволяют говорить о сильной степени влияния экологических и генетических факторов на особенности роста, устойчивость, стволовую продуктивность и репродуктивную способность сосны обыкновенной в новых условиях произрастания. Изучение изменчивости морфометрических показателей генеративных органов сосны обыкновенной в географических культурах свидетельствует о воздействии экологических, географических и генетических факторов на способность к семеношению, размеры, окраску шишек, окраску и массу 1000 шт. семян, выход семян, полнозернистость, энергию прорастания, абсолютную всхожесть. Генетические факторы, которые запрограммированы происхождением, определяют константу различия между размерами и цветом шишек и семян, а также на фоне погодных условий – репродуктивную способность в новом месте произрастания в зависимости от происхождения. Так, нами отмечено, что сосна обыкновенная разного географического происхождения вступает в фазу «цветения» в различные сроки: северные климатипы на 5–7 дней раньше, южные – на 5 дней позднее, чем местный (воронежский климатип). Изменчивость параметров генеративных органов сосны также зависит от ее географического происхождения, размер и масса шишки находятся в прямой зависимости от географической широты. При продвижении с севера на юг длина и масса шишки увеличиваются. Выход семян при свободном опылении к фактору географического происхождения строго не приурочен, так как климатипы окружены различными опылителями. Масса 1000 шт. семян изменяется с той же закономерностью, что и в естественных древостоях ареала сосны: с увеличением географической широты происхождения климатипа возрастает и масса. При перемещении сосны обыкновенной в новые условия произрастания прослеживается существенное влияние генетических факторов, которые и определяют устойчивость, стволовую продуктивность и репродуктивную способность вида.

© Галдина Т.Е., Чернодубов А.И., Михайлова М.И., 2023

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



**Ключевые слова:** географические культуры, сосна обыкновенная, репродуктивная способность, фенологические наблюдения, семена, генеративные органы, масса 1000 шт. семян, масса шишки, длина шишки, толщина шишки, выход семян, окраска семян, энергия прорастания семян, всхожесть

**Для цитирования:** Галдина Т.Е., Чернодубов А.И., Михайлова М.И. Внутривидовое разнообразие *Pinus sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 84–98. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-84-98>

Original article

### Intraspecific Diversity of *Pinus sylvestris* L. in Provenance Trials of the Central Russian Forest-Steppe Area

**Tatyana E. Galdina**<sup>✉</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAR-5879-2020](https://orcid.org/0000-0002-3573-1570), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3573-1570>

**Alexey I. Chernodubov**, Doctor of Agriculture, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5395-4006>

**Maria I. Mikhailova**, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4767-8233>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; [tatyana\\_galdina@mail.ru](mailto:tatyana_galdina@mail.ru)<sup>✉</sup>, [schaxina.mary@yandex.ru](mailto:schaxina.mary@yandex.ru)

Received on April 08, 2021 / Approved after reviewing on July 13, 2021 / Accepted on July 17, 2021

**Abstract.** The provenance trials of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Central Russian forest-steppe area were established by M.M. Veresen in 1959. They have become a natural laboratory for genetic and environmental research in order to solve the practical issues of forest seed zoning. The study of the intraspecific diversity of the provenance trials makes it possible to distinguish patterns in the formation of species with various origins under the influence of different ecological, genetic, and climatic conditions. This article presents the results of a multi-year research project. This allows us to state with full responsibility the strong influence of environmental and genetic factors on the characteristics of growth, resistance, trunk productivity, and reproductive capacity of Scots pine in new growing conditions. The generative parts of the study objects were also examined by morphometric indicators. The changes were revealed in seed production, size, cone coloring, color and weight of 1000 pieces of seeds, seed release, seed fullness, germinative energy, and absolute germination. Genetic factors, which are programmed by ancestry, define the constancy of the difference in size and color of cones and seeds. In addition, genetic factors, along with the weather conditions of a new location, regulate reproductive ability. It was noted that Scots pine with different geographical origins enters the flowering phase at different times. The northern trees are 5–7 days earlier than locals; the southern trees are 5 days later. They were studied in the climate of the Voronezh region. The variability in the characteristics of the generative organs of Scots pine is also affected by its place of birth. The size and weight of the cone are directly related to the geographic latitude. The length and weight of the cone increase with movement from north to south. There is no strict relationship between the release of the seeds during free pollination and the place of origin since the study objects were surrounded by various



pollinators. The weight of 1000 seeds changes with the same regularity as in natural stands of pine: it increases with the geographical latitude of the origin. Consequently, under the influence of new growing conditions, Scots pine is strongly affected by its genetic factors that determine the stability, trunk productivity, and reproductive capacity of the species.

**Keywords:** provenance trials, Scots pine, reproductive ability, phenological observations, seeds, generative organs, weight of 1000 seeds, cone weight, cone length, cone thickness, seed release, seed coloring, seed germination energy, germination

**For citation:** Galdina T.E., Chernodubov A.I., Mikhailova M.I. Intraspecific Diversity of *Pinus sylvestris* L. in Provenance Trials of the Central Russian Forest-Steppe Area. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 84–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-84-98>

### Введение

В настоящее время изучение внутривидовой изменчивости древесных пород и связанного с ней биоразнообразия является одной из значимых и актуальных тем в рамках вопроса экологического состояния лесов. К эффективным методам изучения биологического разнообразия, как отмечал в своих работах Л.Ф. Правдин, относится анализ внутривидовой изменчивости и дифференциации вида [13–15]. Исследования наследственного биоразнообразия, а также анализ и внедрение результатов обследования географической и экологической изменчивости позволяют сформировать общее представление о популяционной структуре вида – основе внутривидовой систематики и селекции, о чем также сказано в источниках [1–11, 17–24]. Г.В. Агафонова указывает, что «изменчивость древесных растений... в основном зависит от генотипа, климатических факторов, условий произрастания» [1, с. 427].

Сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. – одна из основных лесообразующих пород. Она наделена большим генетическим потенциалом, который таит в себе огромный спектр неисследованных вопросов [5]. Географическая изменчивость наследственно закрепленных морфометрических показателей и фонетрических признаков и свойств *P. sylvestris* L. тесно связана с влиянием экологических и географических факторов и имеет огромное значение для лесокультурной практики, а также для теоретического лесоводства [6–10]. Климатические условия среды определяют рост и распространение *P. sylvestris* L., о чем говорится в работах Н.В. Пахарькова (2014), E. Beuker, V. Koski (1995), J. Oleksyn, M.G. Tjoelker, P.B. Reich (1998), T. Galdina, E. Khazova (2019) [12, 16, 17, 20]. Л.Ф. Правдин изучение географической изменчивости признаков и географической дифференциации естественных популяций назвал фундаментальной проблемой, важнейшим направлением решения которой будет морфолого-систематическое исследование изменчивости древесных растений [13, 14].

Значительная дифференциация генофонда сосны обыкновенной объясняет ее успешное произрастание в весьма контрастных физико-географических и экологических условиях [14, 15]. Приспосабливаясь к определенным условиям обитания, сосна сформировала ареальные разновидности, выделяемые в качестве подвидов, климатических экотипов и других внутривидовых таксонов. Суждения по данной проблеме отличаются некоторой противоречивостью, что обусловлено «размытостью» пространственных границ между слабоизолированными популяциями, отсутствием четких критериев выделения внутривидовых таксонов.

Одним из наиболее эффективных методов изучения формового разнообразия генеративных органов основных лесообразующих пород является си-

стематическое исследование внутривидовой изменчивости, дифференциации и популяционной структуры видов. Особый научный эффект изучения систематики вида даст исследование наследственного биоразнообразия в географических культурах. Для изучения влияния условий местопроизрастания на особенности роста сосны обыкновенной были созданы географические культуры [1–10].

Цель работы – исследование влияния генетических особенностей экотипа и условий местопроизрастания на репродуктивную способность *P. sylvestris* L. в географических культурах Центральной лесостепи.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования стали географические культуры сосны обыкновенной, заложенные под руководством М.М. Вересина в 1959 г. в Воронежском лесхозе на землях сельскохозяйственного пользования при сплошной подготовке почвы («Ступинское поле»). На площади 26 га в условиях  $A_2$  произрастают (по 0,05 га) потомства географических популяций из 94 областей бывшего СССР (228 лесхозов). Для опыта взяты семена популяционных сборов от Калининграда до Благовещенска с запада на восток и от Карелии и Архангельска до Закавказья (Азербайджан) с севера на юг. Тип лесорастительных условий для деревьев, от которых получены семена, –  $A_1$ ,  $B_2$ . Географические координаты опыта –  $51^{\circ}96'$  с. ш. и  $39^{\circ}39'$  в. д. [1–3, 15].

Сеянцы выращены в питомнике Воронежского лесничества. Посадка 2-летних сеянцев проведена под меч Колесова с размещением растений  $1,5 \times 0,5$  м. Опытный участок окружен культурами сосны местного происхождения. Таксационная характеристика культур на разных возрастных этапах отражена в работах ранее [1–3, 15].

Для изучения формового разнообразия генеративных органов сосны обыкновенной, обусловленного влиянием экологических и генетических факторов, в географических культурах Центральной лесостепи нами подобраны климатипы (39 шт.), отражающие закономерное изменение географического происхождения мест заготовки семян.

В период 2010–2013 гг. по методике [24] проведены фенологические наблюдения за мужским и женским «цветением» деревьев сосны обыкновенной различного географического происхождения. Для каждого исследуемого объекта отобраны по средним статистическим показателям роста и продуктивности 10 модельных деревьев. Для каждого учетного дерева фиксировали дату начала и дату окончания цветения мужских и женских шишек. Определяли способность к семеношению в новых условиях среды. При изучении изменчивости семеношения сосны обыкновенной различного географического происхождения были использованы методы С.А. Мамаева и Л.Ф. Правдина [11, 14]. В осенний период с 2010 по 2013 г. визуально (по мутовкам, затем суммарно) подсчитано число 2-летних шишек на каждом дереве.

Осенью 2011 г. с 10 модельных деревьев в пределах каждого экотипа были полностью собраны все шишки и учтены по количеству. Количество шишек варьировало от 203 до 517 шт. на каждом учетном объекте. Шишки описывали по методике Л.Ф. Правдина [13, 14]. В число признаков, характеризующих морфологию шишек, входят: цвет шишек, биометрические показатели, строение апофиза семенных чешуй. Цвет шишки определяли глазомерно: светло-коричневый, коричневый, коричнево-бурый, бурый, зеленый, грязно-зеленый.

В лабораторных условиях шишки по 100 шт. раскладывали в пронумерованные ячейки и измеряли длину шишки, ее диаметр в самом широком месте (с точностью до 0,1 мм). Форму апофиза определяли глазомерно: плоский, слабовыпуклый ближе к плоскому, слабовыпуклый, слабовыпуклый ближе к выпуклому, выпуклый, крючковатый [13, 14]. Массу шишек определяли с точностью до 1 мг. Устанавливали диссиметрию шишек для 10 климатипов, произрастающих в контрастных условиях: карельского, ленинградского, новгородского, латвийского, горьковского, минского, воронежского (усманское), житомирского, винницкого, днепропетровского происхождений. Для определения диссиметрии шишки применяли общепринятую методику геометрической модели расположения парастих и генетической спирали в шишке.

Извлечение семян осуществляли после высушивания шишек в сушильном шкафу при температуре 45 °С. Из каждой высушенной шишки извлекали все семена (полные и пустые). Путем легкого надавливания пустые семена отделяли от полных. Семена описывали по методике Л.Ф. Правдина [13, 14]. Глазомерно определяли цвет крылатки. Для характеристики морфологии семян и их качества устанавливали: цвет семени (черные, бурые, пестрые, желтые), массу 1000 шт. семян, полнозернистость, энергию прорастания, абсолютную всхожесть. Полные семена подсчитывали и определяли массу 1000 шт. семян с точностью до 0,5 мг. Массу 1000 шт. семян и цветовые формы окраски семян определяли для 19 климатипов. Для 10 климатипов количество извлеченных семян составило меньше нормы (ГОСТ 13056.4–67), необходимой для расчета показателя. Для 19 климатипов при определении массы 1000 шт. семян брали по 4–5 проб.

Проращивание семян производили в лаборатории Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова с учетом требования ГОСТ 10968–88.

Результаты натурных обследований обрабатывали с использованием программ Excel и StatSoft Statistica 6.0. Вычислены основные статистические характеристики: среднее арифметическое ( $M$ ) и ошибка среднего арифметического ( $m$ ).

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

На основании проведенных наблюдений получены результаты, свидетельствующие о влиянии генетических и экологических факторов на репродуктивную способность сосны обыкновенной в условиях Центральной лесостепи. Фенологические наблюдения обнаружили, что раньше всех весенние фазы цветения по сравнению с местным воронежским климатипом проходят у сосны северного происхождения, а позднее (на 6–8 дней в 2010 г.) – южного и западного климатипов. Северо-западные климатипы по срокам цветения более близки к северным, а сосна из Центрально-Черноземного района занимает промежуточное положение. Максимальный разрыв в сроках массового пыления климатипов составляет 5 дней.

Сосна разного географического происхождения характеризуется различной репродуктивной способностью (табл. 1). Процент семеносящих деревьев снижается в южном направлении. Их доля у сосны из Карелии и Ленинградской области составляет 64–67 %, а у сосны из Белгородской и Днепропетровской областей – только 19 %.

Таблица 1

**Фенологические и репродуктивные особенности сосны обыкновенной разного географического происхождения в Центральной лесостепи**  
**Phenological and reproductive features of Scots pine with different geographical origins in the Central Russian forest-steppe area**

№	Республика/ область/город*	Лесхоз/лесхоззаг*	Географические координаты		Дата цветения (2010 г.)		Средний процент семеносящих деревьев (2010–2013)
			с. ш.	в. д.	начало	конец	
1	Карелия	Заонежский	64°30'	32°00'	16.05	23.05	52
2	Архангельская	Онежский	63°45'	37°40'	15.05	22.05	53
3	Вологодская	Череповецкий	60°15'		17.05	23.05	35
4	Ленинградская	Рощинский		29°40'			67
5	Эстония	Таллинский	59°25'	23°17'	18.05	22.05	50
6	Костромская	Мантуровский	58°18'	44°42'			49
7	Псковская	Струго-красненский	58°15'	25°50'			50
8	Новгородская	Валдайский	58°00'	33°15'			23.05
9	Ярославская	Рыбинский	57°08'	38°40'	35		
10	Латвия	Угальский	57°28'	21°35'	17.05	22.05	64
11	Пермская	Осинский	57°22'	55°20'	18.05	23.05	86
12	Калининская	Калининский	56°48'	35°50'	17.05		57
13	Горьковская	Павловский	56°05'	43°05'	19.05	24.05	68
14	Татарская	Красноборский	55°55'	53°05'	21.05	26.05	60
15	Смоленская	Велижский	55°49'	31°05'	18.05	23.05	79
16	Калининская	Полесский	54°55'	21°05'		24.05	75
17	Брянская	Клинцовский	54°51'	32°35'	19.05	25.05	57
18	Литва	Койшадорский	54°50'	24°20'		23.05	79
19	Рязанская	Солотинский	54°45'	39°50'	18.05	24.05	68
20	Московская	Каширский	54°35'	38°15'	19.05	25.05	60
21	Минская	Борисовский	54°20'	28°30'	20.05		79
22	Мордовия	Зубовский	54°05'	42°40'	21.05		75
23	Калужская	Козельский	54°05'	35°45'	19.05	23.05	67
24	Пензенская	Кузнецкий	53°05'	46°40'	18.05	24.05	50
25	Тамбовская	Тамбовский	52°40'	42°45'	19.05	25.05	19
26	Воронежская	Воронежский (Усманский)	51°50'	39°30'			50
27	Сумская	Королевецкий	51°40'	33°20'	20.05	26.05	19

Окончание табл. 1

№	Республика/ область/город*	Лесхоз/лесхоззаг*	Географические координаты		Дата цветения (2010 г.)		Средний процент семеносящих деревьев (2010–2013)
			с. ш.	в. д.	начало	конец	
28	Курская	Рыльский	51°35'	34°30'	19.05	24.05	35
29	Черниговская	Черниговский	51°30'	31°18'	22.05	28.05	50
30	Белгородская	Старо-Оскольский	51°20'	37°45'	20.05	26.05	19
31	Волынская	Машвичский	51°15'	25°30'		25.05	68
32	Воронежская	Хреновской	51°10'	40°20'	19.05		60
33	Житомирская	Каростенский	50°59'	28°52'	23.05	28.05	39
34	Тернопольская	Кременецкий	50°10'	25°20'	22.05	26.05	55
35	Харьковская	Змиевский	49°45'	36°20'	20.05	25.05	61
36	Винницкая	Яковский	49°32'	30°28'	23.05	27.05	67
37	Марий Эл	Муш-Мари	48°42'	56°20'	22.05	28.05	50
38	Днепропетровск	Новомосковский	48°20'	35°12'	21.05	25.05	19
39	Дрогобынск	Стрийский	48°18'	23°45'	20.05		50

\*Наименования областей, лесхозов актуальны на 1959 г.

Масса шишек варьирует в пределах от 3,8 (у сосны более северного происхождения) до 7,5 г (у более южной сосны). Длина шишки изменяется от 3,2 (у восточного климатипа из Пермской обл.) до 4,1 см (у сосны из Смоленской обл.). Толщина шишки колеблется от 1,80 (как для западного, так и для восточного происхождения) до 2,36 см (у сосны из Костромской обл.) (табл. 2). По форме диссиметрии шишки исследуемые климатипы характеризуются следующим соотношением расположения семенных чешуй – 51 % левой и 49 % правой спирали. У воронежских (местных) климатипов соотношение расположения семенных чешуй обратное: 48 % левой и 52 % правой спирали.

Выход семян при свободном опылении в географических культурах варьирует от 0,56 (Московская обл.) до 2,06 % (Черниговская обл.).

Изменчивость климатипов сосны в географических культурах по выходу семян зависит от характера их опыления (окружения климатипов разными опылителями), репродуктивных особенностей и сроков пыления и цветения. У северных климатипов массовое пыление наступает при сумме температур 557–574 °С, у центрально-черноземных – 575, южных – 593, западных – 612. Масса 1000 шт. семян (табл. 3) колеблется от 4,13 (Республика Карелия) до 10,21 г (Винницкая обл.) и у местного климатипа составляет 7,05 г.

Таблица 2

Параметры генеративных органов и выход семян сосны обыкновенной разного географического происхождения  
Parameters of generative organs and seed release of Scots pine with different geographical origins

№	Масса одной шишки, г				Длина шишек				Толщина шишек				Выход семян, %
					см								
	М	±m	C <sub>v</sub> , %	P, %	М	±m	C <sub>v</sub> , %	P, %	М	±m	C <sub>v</sub> , %	P, %	
1	4,4	0,55	13	1,58	3,49	0,48	17	2,05	2,35	0,04	20	2,14	1,57
2	4,3	0,52	12	1,44	3,60	0,26	12	1,41	1,85		12	1,41	1,41
3	3,8	0,67	16	1,84	3,63	0,24	11	1,29	1,87	0,03	15	1,73	1,29
4	4,8	0,63	15	1,79	3,51	0,36	15	1,69	2,15			1,79	1,32
5	4,9	0,65		1,82	3,58	0,35	16	1,83	1,92	0,02	12	1,42	1,02
6	4,7	0,66	16	1,86	3,56	0,64	24	2,71	2,36	0,03	19	2,19	1,10
7	4,6	1,20	15	3,50	3,42	0,27	13	1,49	1,81	0,02	10	1,12	1,20
8	5,3	0,70	17	2,04	3,43	0,34	14	1,73	1,97	0,03	12	1,42	0,98
9	6,0	0,68	18	2,03	3,34	0,41	18	2,00	2,05		18	2,02	0,92
10	5,3	0,60	15	1,70	3,53	0,25	13	1,39	1,80	0,02	10	1,21	1,56
11	7,2	0,56		1,75	3,20	0,28		1,57	1,79	0,03	12	1,46	1,23
12	7,0	0,72	16	1,96	3,67	0,34	15	1,77	1,92	0,02	10	1,18	1,64
13	5,1	0,79	17	1,99	3,96	0,28	13	1,42	1,97	0,03	13	1,53	1,98
14	6,7	0,81	18	2,40	3,37	0,30		1,65	1,81		14	1,86	1,82
15	6,6	0,74	14	1,81	4,09	0,35		1,71	2,05	0,02	10	1,32	1,46
16	5,5	0,69	16	1,94	3,56	0,26	12	1,45	1,78	0,03	13	1,60	1,08
17	6,1			1,90	3,63	0,31	14	1,66	1,87	0,02	10	1,21	1,74
18	5,9	0,87	17	2,24	3,88	0,41	15	2,01	2,04	0,03	11	1,48	1,82
19	5,7	0,88	19	2,39	3,69		17	2,15	1,91	0,04	15	1,86	0,78
20	5,4	0,79	16	2,06	3,82	0,31	13	1,59	1,95	0,03	10	1,31	0,56
21	6,2	0,80	18	2,08	3,84	0,37	15	1,80	2,05	0,02	11	1,26	1,56
22	6,1	0,62	13	1,57	3,94	0,39	14	1,84	2,13			1,44	1,68
23	5,3	1,32	36	4,53	3,91	0,34		1,75	1,94	0,03	13	1,58	0,68
24	4,5	0,70	16	1,95	3,59	0,32	1,65	0,02		11	1,32	1,23	
25	6,0	0,71	15	1,78	3,99	0,38	16	1,91	1,04	0,03	13	1,54	0,98
26	6,8	0,75	18	2,14	3,51	0,35		1,83	1,92	0,04	16	1,88	0,47
27	6,1	0,71	15	1,84	3,89	0,33	13	1,67	1,83	0,02	8	1,04	1,36
28	5,1	0,63		1,69	3,94		14	1,66	2,13	0,03	14	1,58	0,88
29	7,2	0,58	13	1,61	3,96	0,26	11	1,39	2,05		0,02	12	1,42
30	6,2	0,73	17	2,00	3,73	0,32	14	1,61	1,82	1,34			1,86
31	5,2	0,73		1,96	3,84	0,31		1,65	1,96	0,03	11	1,28	1,23
32	6,1	0,69	16	1,90	3,60		1,66	1,79	1,48			0,65	
33	7,1	0,87	17	2,24	3,87	0,41	15	2,01	1,98	0,04	15	1,86	1,45
34	5,9	0,88	19	2,39	3,76		17	2,15	1,75	0,03	10	1,31	1,33
35	6,1	0,79	16	2,06	3,72	0,31	13	1,59	1,99	0,02	11	1,26	1,23
36	5,2	0,80	18	2,08	3,90	0,37	15	1,80	1,81			1,44	1,26
37	6,2	0,62	13	1,57	3,61	0,39	14	1,84	1,87	0,03	13	1,58	1,65
38	7,5	1,32	36	4,53	3,64	0,34		1,75	1,99	0,02	11	1,32	1,52
39	7,1	0,70	16	1,95	3,73	0,32		1,65	1,88	0,03	13	1,54	1,67

Примечание: Номер соответствует номеру в табл. 1. C<sub>v</sub> – коэффициент вариации по Мамаеву; P – коэффициент достоверности.



В середине сентября шишки северных и западных климатипов имеют светло-коричневый и коричнево-бурый цвета, а южные и юго-западные – зеленый и грязно-зеленый, что свидетельствует о разных сроках созревания шишек. Из данных табл. 3 видно, что на долю черных семян приходится 68 %, бурых – 17, пестрых – 10, желтых – 5. Крылаток желтой окраски (см. рисунок) было 30, светлой с темным концом – 17, светло-коричневой – 26, темно-коричневой – 19, бежевой – 8 %.

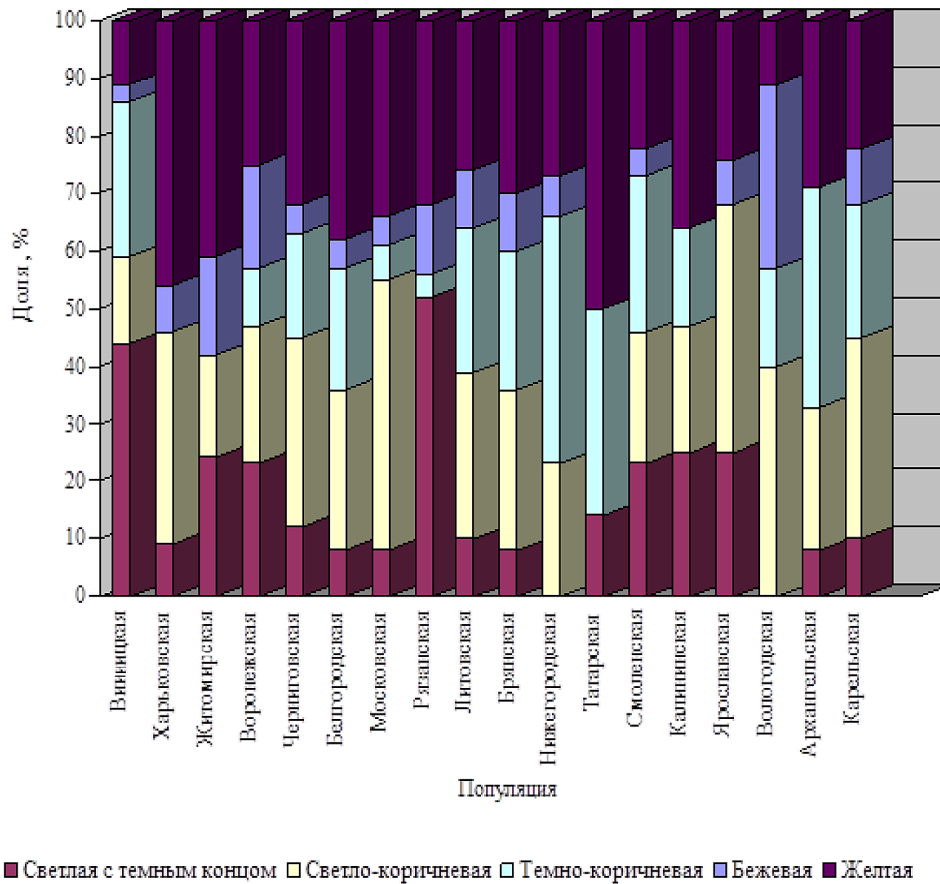
Таблица 3

**Изменчивость массы 1000 шт. семян и соотношение форм сосны разного географического происхождения по цвету**  
**Weight variation for 1000 pcs. of seeds and seed colors compared to geographic origins of Scots pine**

Популяция	Масса 1000 шт. семян, г	Соотношение цветовых форм окраски семян сосны в географических культурах, %			
		черные	бурые	пестрые	светлые
Винницкая	10,21±0,41	48	47	5	–
Харьковская	8,61±0,38	83	7	10	–
Житомирская	7,29±0,40	81	4	12	3
Воронежская	7,05±0,26	75	17	4	4
Черниговская	6,80±0,31	72	5	18	5
Белгородская	6,57±0,36	50	11	30	9
Московская	6,43±0,28	67		17	5
Рязанская	6,39±0,27	62	13	13	12
Литовская	6,09±0,40	76	10	9	5
Брянская	6,06±0,37	70	8	17	
Нижегородская	6,01±0,36	77	15	5	3
Татарская	5,94±0,25	86	14	–	–
Смоленская	5,70±0,28	72	23	–	5
Калининская	5,63±0,28	86	14	–	0
Ярославская	5,25±0,30	58	35	–	7
Вологодская	4,49±0,26	29	38	18	15
Архангельская	4,17±0,40	69	8	15	8
Карельская	4,13±0,39	49	31	10	10
Среднее по группе	6,26	68	17		5

Энергия прорастания семян (сбор в декабре) составляет 83,7 % – средняя для 39 климатипов при коэффициенте изменчивости 14,2 %, а всхожесть – 90,5 % при низком коэффициенте вариации (8,3 %). Выявлена зависимость посевных качеств семян (сбор в августе–октябре) от их географического происхождения (табл. 4).





Соотношение форм сосны разного географического происхождения по цвету семенной крылатки

Correlation diagram for Scots pine with different geographical origins and colors of the seed lionfish

В более суровых климатических условиях деревья имеют более короткий вегетационный период и более высокие посевные качества семян, чем деревья, произрастающие в мягких условиях среды. Различия между климатипами в большей мере проявляются в ранние сроки, а в более поздние сглаживаются. Между отдельными деревьями также наблюдаются различия по срокам созревания семян, например у карельского климатипа всхожесть семян отдельных деревьев колеблется от 27 до 90 %, у воронежского – от 0 до 54 %, у вологодского – 0–5 %.

Исследование в лабораторных условиях всходов сосны показало, что в среднем для ареала число семядолей составляет 5,7 шт. – от 4,6 (архангельская) до 6,2 (днепропетровская) – изменчивость по ареалу – 12,7 % (табл. 4). Число семядолей увеличивается от северных популяций к южным (на 0,9–1,1 ед.) и от восточных к западным (на 0,6–1,6 ед.). Коэффициент корреляции числа семядолей с широтой пункта сбора семян равен  $0,37 \pm 0,15$ ; с долготой –  $0,35 \pm 0,15$ ; с массой 1000 семян –  $0,42 \pm 0,13$ .

Таблица 4

**Всхожесть и энергия прорастания семян сосны различного географического происхождения  
Germination and germination energy of pine seeds of various geographical origins**

№	Энергия прорастания, % (сбор в декабре)			Всхожесть, % (сбор в декабре)			Всхожесть, %						Число семян/долей, шт.		
	M	±m	Cv, %	M	±m	Cv, %	август		сентябрь		октябрь		M	±m	Cv, %
							M	±m	M	±m	M	±m			
1	72,6	0,55	11	86,6	0,48	6,3	11,3	0,36	25,6	0,34	72,6	0,32	4,7	0,69	11
2	63,5	0,52	10	77,5	0,26	5,6	16,6	0,35	28,6	0,28	63,5	0,31	4,6	0,87	10
3	67,6	0,67	14	86,6	0,24	6,6	3,8	0,64	15,6	0,30	67,6		4,8	0,88	14
4	75,8	0,63	12	93,8	0,36	7,2	12,8	0,27	36,8	0,35	75,8	0,41	4,7	0,79	12
5	71,8	0,65	14	90,5	0,35	8,0	5,9	0,34	15,6	0,26	71,8		4,9	0,80	14
6	96,5	0,66	12	97,1	0,64	9,3	45,8	0,41	55,6	0,31	96,5	0,31	4,9	0,62	12
7	91,6	1,20	10	95,8	0,27	6,3	51,5	0,25	76,2	0,41	91,6	0,37	4,8	0,60	10
8	70,0	0,70	15	88,2	0,34	6,3	10,0	0,28	38,6		70,0	0,39	5,2	0,56	15
9	78,0	0,68	14	83,5	0,41	8,9	35,0	0,34	52,3	0,31	78,0	0,34	5,1	0,72	14
10	76,9	0,60	9	85,9	0,25	10,2	46,9	0,28	62,3	0,37	76,9	0,32	6,1	0,79	9
11	91,2	0,56	10	93,2	0,28	8,9	43,6	0,30	56,8	0,39	91,2		5,3	0,81	10
12	90,3	0,72	14	98,3	0,34	7,3	12,5	0,35	38,6	0,34	90,3	0,28	6,1	0,74	14
13	91,4	0,79	15	98,4	0,28	6,1	40,0	0,26	78,3	0,32	91,4	0,34	5,9	0,69	15
14	76,4	0,81	10	81,6	0,30	8,7	42,3	0,31	66,3	0,41	76,4	0,28	5,8	0,69	10
15	96,4	0,74	12	97,2	0,35	8,3	55,2	0,41	78,6	0,25	96,4	0,30	5,7	0,87	12
16	78,3	0,69	10	77,5	0,26		14,3		36,8	0,28	65,0	0,35	5,9	0,88	10
17	80,1	0,69	16	88,3	0,31	7,9	40,0	0,31	72,6	0,34	80,1	0,26	6,1	0,79	16
18	91,6	0,87	11	97,2	0,41	8,3	51,6	0,37	68,3	0,28	91,6	0,34	6,1	0,65	11
19	64,0	0,88	15	77,8	0,41	5,2	17,5	0,39	46,5	0,30	64,0	0,28	5,9	0,66	15

Окончание табл. 4

№	Энергия прорастания, % (сбор в декабре)			Всхожесть, % (сбор в декабре)			Всхожесть, %						Число семян/долей, шт.		
	M	±m	Cv, %	M	±m	Cv, %	август		сентябрь		октябрь		M	±m	Cv, %
							M	±m	M	±m	M	±m			
20	92,6	0,79	11	89,3	0,31	9,9	46,3	0,34	78,6	0,35	92,6	0,30	5,8	1,20	11
21	93,6	0,80	14	98,6	0,37	8,9	62,2	0,32	76,4	0,26	93,6	0,35	6,1	0,70	14
22	60,0	0,62	12	76,2	0,39	10,3	28,6	0,38	66,4	0,31	60,0	0,26	5,8	0,68	12
23	78,2	1,32	22	71,3	0,34	6,8	29,4	0,35	42,5	0,41	58,4	0,31	5,7	0,60	22
24	80,4	0,70	11	88,3	0,32	8,3	25,0	0,33	42,6	0,31	80,4	0,41	5,9	0,56	11
25	78,4	0,71	11	87,2	0,38	10,2	44,3	0,33	66,2	0,31	78,4	0,32	5,9	0,72	11
26	90,3	0,75	15	97,3	0,35	9,9	57,1	0,26	78,4	0,37	90,3	0,38	5,9	0,79	15
27	81,6	0,71	15	92,1	0,33	5,3	5,8	0,32	44,6	0,39	81,6	0,35	5,8	0,81	15
28	85,4	0,63	12	93,7	0,33	7,8	42,7	0,31	64,8	0,34	85,4	0,33	5,8	0,74	12
29	90,1	0,58	15	93,3	0,26	8,2	50	0,31	88,4	0,32	90,1	0,33	5,6	0,69	15
30	74,8	0,73	12	82,7	0,32	9,9	17,4	0,41	64,4	0,38	74,8	0,26	5,6	0,69	12
31	91,8	0,73	14	97,8	0,31	8,3	48,9	0,35	72,6	0,35	91,8	0,32	6,1	0,65	14
32	87,2	0,69	10	91,5	0,31	7,7	38,6	0,26	78,6	0,33	87,2	0,31	6,0	0,66	10
33	92,6	0,87	10	96,3	0,41	6,8	52,4	0,28	80,2	0,33	92,6	0,31	5,9	1,20	10
34	96,2	0,88	14	98,5	0,41	8,9	59,3	0,36	78,5	0,26	96,2	0,41	6,1	0,70	14
35	54,6	0,79	15	68,2	0,31	8,2	27,3	0,25	32,5	0,32	54,6	0,41	5,7	0,62	15
36	93,6	0,80	14	95,6	0,37	12,3	32,5	0,28	68,4	0,31	93,6	0,31	6,1	1,32	14
37	76,4	0,62	10	76,4	0,39	9,3	43,2	0,22	62,4	0,31	76,4	0,37	6,0	0,70	10
38	91,2	1,32	11	95,2	0,34	14,0	45,6	0,36	72,4	0,41	91,2	0,42	6,2	0,71	11
39	7,1	0,70	16	97,2	0,32	8,3	39,1	0,56	72,4	0,41	88,2	0,33	6,1	0,69	15

Примечание: Номер соответствует номеру в табл. 1.

## Заключение

Результаты наблюдений, проведенных в географических культурах *Pinus sylvestris* L. в Центральной лесостепи, свидетельствуют о сильной дифференциации вида, обусловленной генетическими особенностями климатипов, сформированными под влиянием экологических факторов в местах естественного происхождения, и разной реакцией на экологические факторы в условиях испытания.

В новых условиях местопроизрастания сосны обыкновенной под генетическим контролем находятся такие показатели, как срок «цветения», массовое пыление, репродуктивная способность. Высокая степень дифференциации и формового разнообразия шишек и семян исследуемых объектов объясняется генетическими характеристиками климатипов, сформированными под воздействием условий мест происхождения, и реакцией на условия пункта испытания, что определяет качественные и количественные показатели репродуктивных органов.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает необходимость достоверных данных об особенностях роста климатипа в новых условиях местопроизрастания при переброске семян из одних районов в другие. Особое значение это имеет при определении районов-поставщиков семян сосны обыкновенной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агафонова Г.В. Влияние происхождения семян сосны на рост семенного потомства в условиях Среднего Урала // Повышение продуктивности лесов Урала. Свердловск: Урал. лесотехн. ин-т, 1990. С. 106–109.

Agafonova G.V. The Influence of the Origin of Pine Seeds on the Growth of Seed Offspring in the Middle Urals. *Increasing Forest Productivity in the Urals*. Sverdlovsk, USFEU Publ., 1990. pp. 106–109. (In Russ.).

2. Галдина Т.Е. Рост сосны обыкновенной в географических культурах центральной лесостепи // Дендрэкология и лесоведение: материалы Всерос. конф., посвящ. 50-летию Сиб. отд-ния РАН, Красноярск, 02–04 окт. 2007 г. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 30–32

Galdina T.E. Growth of Scots Pine in Provenance Trials of the Central Forest-Steppe. *Dendroecology and Forest Science: Proceedings of All-Russian Conference dedicated to the 50th anniversary of the Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk, 02–04 October 2007*. Krasnoyarsk, FRC KSC SB RAS Publ., 2007, pp. 30–32. (In Russ.).

3. Галдина Т.Е., Романова М.М. Исследование особенности роста географических культур сосны обыкновенной в условиях Центральной лесостепи // Политематич. сетевой электрон. науч. журн. КубГАУ. 2017. № 127(03). С. 865–874.

Galdina T.E., Romanova M.M. Studying the Growth Characteristics of Pine Provenance Trials in the Central Forest-Steppe. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2017, no. 127(03), pp. 865–874. (In Russ.). <https://doi.org/10.21515/1990-4665-127-060>

4. Галдина Т.Е., Романова М.М., Токорева М.О. Состояние географических культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Центральной лесостепи // Политематич. сетевой электрон. науч. журн. КубГАУ. 2012. № 77(03). С. 10–20.

Galdina T.E., Romanova M.M., Tokoreva M.O. The State of Provenance Trials of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Central Forest-Steppe. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2012, no. 77 (03), pp. 10–20. (In Russ.).

5. Ирошников А.И. Географические культуры хвойных в Южной Сибири // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 4–110.

Iroshnikov A.I. Provenance Trials of Conifers in Southern Siberia. *Provenance Trials and Coniferous Plantations in Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. pp. 4–110. (In Russ.).

6. Кузьмин С.Р. Динамика радиального роста сосны обыкновенной в географических культурах на дерново-подзолистой песчаной почве // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXX, № 1-2. С. 106–110.

Kuzmin S.R. Dynamics of the Radial Growth of Scots Pine in Provenance Trials on Sod-Podzolic Sandy Soil. *Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the Boreal Area*, 2012, vol. 30, no. 1-2, pp. 106–110. (In Russ.).

7. Кузьмин С.Р., Ваганов Е.А., Кузьмина Н.А., Милютин Л.И. Особенности трахеид древесины у климатипов *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в географических культурах // Ботан. журн. 2008. Т. 93, № 1. С. 10–21.

Kuzmin S.R., Vaganov E.A., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Specificity of Wood Tracheids of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Climates in the Provenance Trial. *Botanicheskiy Zhurnal*, 2008, vol. 93, no. 1, pp. 10–21. (In Russ.).

8. Кузьмин С.Р., Ваганов Е.А., Кузьмина Н.А., Милютин Л.И., Силкин П.П. Плотность устьиц хвои сосны обыкновенной в географических культурах Приангарья // Лесоведение. 2009. № 2. С. 35–40.

Kuzmin S.R., Vaganov E.A., Kuzmina N.A., Milyutin L.I., Silkin P.P. Density of Needle Stomata in Different Scots Pine Provenances in Provenance Trials (the Angara River Basin). *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2009, no. 2, pp. 35–40. (In Russ.).

9. Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А., Ваганов Е.А. Динамика роста сосны обыкновенной в географических культурах // Лесоведение. 2013. № 1. С. 30–38.

Kuzmin S.R., Kuzmina N.A., Vaganov E.A. Growth Dynamics of Scots Pine in Provenance Trial Plantations. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2013, no. 1, pp. 30–38. (In Russ.).

10. Кузьмин С.Р., Кузьмина Н.А., Милютин Л.И., Муратова Е.Н. Внутривидовая изменчивость морфологических признаков хвои у сосны обыкновенной в географических культурах Приангарья // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2004. № 10. С. 41–45.

Kuzmin S.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I., Muratova E.N. Intraspecific Variability in Morphological Characteristics of Scots Pine Needles in Provenance Trials of the Angara River Basin. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*, 2004, no. 10, pp. 41–45. (In Russ.).

11. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 282 с.

Мамаев S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 282 p. (In Russ.).

12. Пахарькова Н.В., Кузьмина Н.А., Кузьмин С.Р., Ефремов А.А. Морфофизиологические особенности хвои у разных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 1. С. 107–113.

Pakharkova N.V., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Efremov A.A. Morphophysiological Traits of Needles in Different Climates of Scots Pine in Provenance Trial. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 107–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1995425514010107>

13. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная: Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 190 с.

Pravdin L.F. *Scots Pine: Variability, Intraspecific Systematics and Selection*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 190 p. (In Russ.).

14. Правдин Л.Ф. Внутривидовая систематика и ее значение для селекции // Проблемы современной ботаники. Т. 1. М.: Наука, 1965. С. 73–76.

Pravdin L.F. Intraspecific Systematics and Its Meaning for Selection. *Problems of Modern Botany. Vol. 1*. Moscow, Nauka Publ., 1965. pp. 73–76.

15. Правдин Л.Ф., Вакуров А.Д. Рост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного географического происхождения в подзоне хвойно-широколиственных лесов // Сложные боры хвойно-широколиственных лесов и пути ведения лесного хозяйства в лесопарковых условиях Подмосковья. М.: Наука, 1968. С. 160–195.

Pravdin L.F., Vakurov A.D. Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) of Different Geographical Origin in the Subzone of Coniferous-Deciduous Forests. *Complex Pine Forests of Coniferous-Deciduous Forests and Forest Management Methods in the Forest-Park Conditions of the Moscow Region*. Moscow, Nauka Publ., 1968. pp. 160–195. (In Russ.).

16. Чернодубов А.И., Галдина Т.Е., Смогунова О.А. Географические культуры сосны обыкновенной на юге Русской равнины. Воронеж: ВГЛТА, 2005. 128 с.

Chernodubov A.I., Galdina T.E., Smogunova O.A. *Provenance Trials of Scots Pine in the South of the Russian Plain. Monograph*. Voronezh, VGLTA Publ., 2005. 128 p. (In Russ.).

17. Beuker E., Koski V. Adaptation of Tree Populations to Climate as Reflected by Ages Provenance Tests. *Caring for the Forest: Research in a Changing World. Poster Abstracts. IUFRO XX World Congress, August 6–12, 1995*. Finland, Tampere, 1995, p. 248.

18. Galdina T., Khazova E. Adaptability of *Pinus sylvestris* L. to Various Environmental Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, no. 1, p. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012002>

19. Jonsson A., Ekberg I., Eriksson G. Flowering in a Seed Orchard of *Pinus sylvestris* L. *Studia Forestalia Suecica*, 1976, no. 135, pp. 1–38.

20. Oleksyn J., Tjoelker M.G., Reich P.B. Adaptation to Changing Environment in Scots Pine Populations Across a Latitudinal Gradient. *Silva Fennica*, 1998, vol. 32, no. 2, pp. 129–140. <https://doi.org/10.14214/sf.691>

21. Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*: Responses to Climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, no. 9, pp. 912–929. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x>

22. Reich P.B., Oleksyn J. Climate Warming Will Reduce Growth and Survival of Scots Pine Except in the Far North: Scots Pine Growth and Survival Following Climate Transfer. *Ecology Letters*, 2008, vol. 11, no. 6, pp. 588–597. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01172.x>

23. Savolainen O., Bokma F., Garcia-Gil R. Genetic Variation in Cessation of Growth and Frost Hardiness and Consequences for Adaptation of *Pinus sylvestris* to Climatic Changes. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 197, no. 1-3, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.006>

24. Suvanto S., Nöjd P., Henttonen H.M., Beuker E., Mäkinen H. Geographical Patterns in the Radial Growth Response of Norway Spruce Provenances to Climatic Variation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, vol. 222, pp. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.003>

**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\*221.09:630\*164.8:630\*228.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-99-112

## Влияние реконструктивной рубки в лиственнно-еловом древостое на корневую конкуренцию пород

*А.Ю. Карпечко*<sup>✉</sup>, канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [AAL-8675-2020](https://orcid.org/0000-0002-1693-2510),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1693-2510>

*С.М. Синькевич*, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [B-6119-2018](https://orcid.org/0000-0002-4523-8392),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-4523-8392>

Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; [anna.karpechko@gmail.com](mailto:anna.karpechko@gmail.com)<sup>✉</sup>, [sergei.sinkevich@krc.karelia.ru](mailto:sergei.sinkevich@krc.karelia.ru)

Поступила в редакцию 09.04.21 / Одобрена после рецензирования 15.07.21 / Принята к печати 20.07.21

**Аннотация.** Преобладание смешанных древостоев в продуктивном лесном фонде среднетаежной подзоны Северо-Запада России делает актуальным изучение особенностей их роста и развития. Важным аспектом экологических исследований являются конкурентные взаимоотношения древесных пород. В производных насаждениях, сформировавшихся в результате интенсивной эксплуатации коренных ельников, ель, как правило, находится в подчиненном положении. Восстановление ее господства – актуальная хозяйственная и экологическая проблема. При единстве подходов к ведению хозяйства в лиственнно-еловых древостоях данные исследований структуры корневых систем существенно различаются в зависимости от возраста и географического положения насаждения. Представлены результаты изучения корневой конкуренции между елью и лиственными породами в 70-летнем насаждении черничного типа леса, пройденном 35 лет назад интенсивной реконструктивной рубкой. В смешанных древостоях с различной долей участия ели методом почвенных монолитов исследована масса тонких корней и ее локализация в верхних почвенных горизонтах. Характеристики древостоев рассчитаны по материалам периодических сплошных переучетов на пробных площадках и по результатам измерения диаметров деревьев на круговых площадках вокруг мест взятия монолитов. Приведены данные о динамике мощности лесной подстилки и живого напочвенного покрова. Рассмотрена связь между подземной и надземной частями древостоя. Показано, что корни ели могут занимать одну экологическую нишу с корнями лиственных пород. Корреляционный анализ выявил статистически значимую связь массы тонких корней ели с конкурентным влиянием лиственных пород, долей ели в составе древостоя и ее текущим приростом по запасу. Обнаружены существенные различия массы корней ели при ее совместном произрастании с березой и осиной. Сделан вывод о комплексном характере зависимости массы корней ели от близости материнских деревьев и пространственной неоднородности органогенных горизонтов почвы. Полученные данные важны для обоснования регулирования состава и структуры лиственнно-еловых древостоев в интересах выращивания устойчивых хозяйственно-ценных насаждений.

**Ключевые слова:** ель, береза, осина, смешанный древостой, структура древостоя, почва, тонкие корни, конкуренция, корневая конкуренция, реконструктивная рубка

**Благодарности:** Исследование проведено за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН).

*Для цитирования:* Карпечко А.Ю., Синькевич С.М. Влияние реконструктивной рубки в листовенно-еловом древостое на корневую конкуренцию пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 99–112. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-99-112>

Original article

### Influence of Reconstructive Cutting in Deciduous-Spruce Stands on Root Competition of Species

*Anna Yu. Karpechko*<sup>✉</sup>, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAL-8675-2020](https://orcid.org/0000-0002-1693-2510),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-2510>

*Sergey M. Sinkevich*, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [B-6119-2018](https://orcid.org/0000-0002-4523-8392),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-8392>

Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of RAS, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; [anna.karpechko@gmail.com](mailto:anna.karpechko@gmail.com)<sup>✉</sup>, [sergei.sinkevich@krc.karelia.ru](mailto:sergei.sinkevich@krc.karelia.ru)

*Received on April 09, 2021 / Approved after reviewing on July 15, 2021 / Accepted on July 20, 2021*

**Abstract.** The predominance of mixed forest stands in a productive forest fund, which is located in the middle taiga subzone of Northwest Russia, determines the relevance of an investigation of the growth and development characteristics of the trees. In secondary stands, created by an extensive human consumption of primary spruce stands, spruce trees are generally presented in a minor quantity. The recovery of their dominance is an urgent economic and ecological issue. Despite the unity of approaches concerning the maintenance of deciduous-spruce forests, the research characteristics on the structure of the root systems differ considerably along with age and geographical position. This article investigates a root system competition between spruce and deciduous species in a 70-year-old blueberry-type forest that was 100 thinning by a reconstructive cutting 35 years ago. The mass of fine roots and their distribution in the upper solid layers were examined by the method of soil monoliths in the mixed stands with different proportions of spruce. The numerical characteristics of the stands were determined by the results of a regular complete enumeration on the trail plots. Besides, the tree diameters were measured around the circular plots, which were made for the collection of the monoliths. The records were made on the dynamics of changes in forest floor thickness and vegetation. The relationship between the underground and elevated parts of the stands was explored. It was shown that the roots of spruce can occupy the same ecological niche as the roots of deciduous species. A correlation analysis revealed a statistically significant relationship between the mass of fine spruce roots and the competitive influence of deciduous species, the proportion of spruce in the stand, and its current volume increment. There was a significant difference in spruce root mass under joint growth with birch and aspen. Therefore, it was concluded that this phenomenon has a complex nature. Namely, the mass of the spruce roots has a direct dependency on their closeness to the maternal trees in combination with the spatial heterogeneity of the organic soil layers. The gained findings are important for the regulation of the composition and structure of the mixed deciduous-spruce stands for growing sustainable stands with a high economic value.

**Keywords:** spruce, birch, aspen, mixed stand, stand structure, soil, fine roots, competition, root competition, reconstructive cutting

**Acknowledgements:** The study was financed by the federal budget for the state assignment of the KRC RAS (Forest Research Institute of the KRC RAS).



**For citation:** Karpechko A.Yu., Sinkevich S.M. Influence of Reconstructive Cutting in Deciduous-Spruce Stands on Root Competition of Species. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 3, pp. 99–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-99-112>

### *Введение*

В начале XX в. В.Н. Сукачев обратил внимание на возрастающий под влиянием трудов Г.Ф. Морозова интерес лесоводов к конкуренции в растительных сообществах [11]. Позже В.Н. Сукачев пришел к выводу о превалировании роли корневых систем по сравнению с ролью надземных частей во взаимоотношениях растений [12]. С.Н. Сеннов [9], анализируя труды В.Н. Сукачева, В.Г. Карпова, А.Я. Орлова и других исследователей, заключил, что в конкуренции деревьев «доминирует конкуренция между тонкими физиологически активными корнями» и «основная арена конкуренции – маломощный корнеобитаемый слой почвы» [9, с. 35]. В ходе выполнения Международной биологической программы (1964–1974) были существенно уточнены представления о формировании и функционировании корневых систем лесных фитоценозов. При этом однозначного ответа на вопрос о значении корневой конкуренции для формирования производительности лесных насаждений до сих пор нет в связи с разнообразием объектов, применявшихся методик и трудоемкостью исследований.

Тонкие корни, представляющие интерес для исследований в области физиологии древесных растений, лесного почвоведения и лесной экологии [5, 14, 23, 25 и др.], играют важную роль в жизни дерева. Они активно вовлечены в круговорот углерода в связи с их значительной долей в фитомассе и более высокой по сравнению с надземными частями деревьев скоростью разложения [37].

При изучении корней их принято делить на фракции по толщине, исходя из выполняемых ими функций. А.Я. Орлов [5] отдельно выделял корни диаметром менее 0,6 мм и относил их к физиологически активным. Финские исследователи [23, 25, 30], изучавшие биомассу тонких корней, включали фракцию диаметром до 2 мм в тонкие, а 2–5 мм – в мелкие корни [25]. Аналогичной позиции придерживаются китайские исследователи [35], относящие к тонким корни до 2 мм. В то же время в категорию тонких корней часто включают фракцию диаметром менее 1 мм [15]. Таким образом, единства в подходах к разделению корней на фракции и общепризнанного понимания терминов «тонкие» и «сосущие корни» в научной литературе нет, что также отмечает В.А. Усольцев [14]. Это может усложнять обобщение и анализ данных.

Многие исследования посвящены выявлению статистических зависимостей между надземными и подземными частями древостоев [8, 20, 22, 26, 30, 40]. В работах, где отмечена связь массы корней с диаметром ствола отдельных деревьев [26], показано, помимо существенной корреляции, наличие определенного баланса в распределении фитомассы между ее надземной и подземной частями. При этом есть результаты [22], констатирующие слабую тесноту связи, особенно при сравнении разных пород и условий произрастания. Исследование связи между массой корней и абсолютной полнотой древостоев выявило, что последняя может обуславливать до 35 % дисперсии массы тонких корней [30] на суходолах и осушенных торфяниках, однако указывается, что в ряде случаев происходит уменьшение отношения подземной массы древостоя к надземной с увеличением возраста деревьев. Отрицательный результат был получен при

попытке выявления связи между суммой площадей сечений и массой корней в еловых древостоях [4].

При оценке результатов изучения массы тонких корней следует учитывать ее значительную вариабельность в зависимости от времени года, связанную в первую очередь с ежегодным частичным отмиранием. Согласно данным немецких исследователей, в высокопроизводительных средневозрастных ельниках масса отмерших мелких корней может превышать массу живых в среднем в 1,5 раза [24], а в еловых насаждениях средней производительности в возрасте от 35 до 105 лет – в 1,5–3 раза [33]. Канадские исследователи на основании изучения баланса биомассы в спелых еловом и осиновом насаждениях указывают на короткую продолжительность жизни и быстрое разложение тонких корней [28]. Ежегодная возобновляемость длины тонких корней фракций 0,2–2 мм составляет в 85-летнем осиннике 35 %, а в 20–40-летнем – 22 % [36]. Эти процессы связаны с регулярным обновлением (частичным или полным) листового аппарата, а значит – с приростом древостоя. Ежегодные колебания прироста древесины стволов поддаются довольно точной оценке, но столь же частые определения корневой массы чрезвычайно трудоемки. Поэтому представляется целесообразным поиск связи массы тонких корней с текущим приростом.

Ель и береза в производных насаждениях, как правило, произрастают вместе, особенно на ранних стадиях развития сообщества, при этом в смешанных древостоях корневая система одной из пород в большинстве случаев развита сильнее. Если количество березы в составе насаждения превышает 30 %, то совместное существование двух этих пород отрицательно сказывается на росте и жизнедеятельности ели, в том числе ее корневой системы [6]. На участках со схожими лесорастительными условиями береза формирует корневую систему, характеризующуюся большей массой по сравнению с хвойными породами [2]. Г.А. Чибисов [17], изучавший корневые системы 8–50-летних березово-еловых насаждений, пришел к выводу об угнетении корней ели березой, которое по мере естественного изреживания березы и разложения ее корней ослабевает в связи с разделением экологических ниш.

Положение ели в осинниках, по мнению литовских лесоводов [3], сходно с ее положением в березняках. По данным канадских исследователей, в 85–90-летних осинниках с примесью 23–37 % ели белой и ели черной (*Picea glauca*, *P. mariana*) масса тонких корней ели в подстилке и минеральном слое на 10–30 % меньше массы корней осины [21]. Исследование [31], проведенное в высокопродуктивных 100-летних осиново-еловых древостоях разного состава, выявило, что масса корней ели черной вдвое меньше в подстилке и в 4 раза – в минеральном слое, чем корней осины. Однако если в первом случае доля корней и ели, и осины, находящихся в минеральном слое почвы, составляла около 45 %, то в более бедных условиях в подстилке было сосредоточено около 80 % тонких корней обеих пород. Сравнение этих древостоев с чистыми (>70 % запаса одной породы) показало, что в последних насыщенность минерального слоя почвы тонкими корнями выше в 1,5–2 раза по сравнению со смешанными. В 25-летних культурах ели белой с примесью от 10 до 50 % порослевой осины средняя протяженность тонких корней ели на единицу площади не имела существенных различий в разных вариантах породного состава, а в минеральном слое (до 15 см) оказалась на 35 % меньше, чем в подстилке [29]. Сходные

результаты получены на Среднем Урале для 30-летних еловых культур, находящихся под пологом последующего возобновления лиственных. При общем 16-кратном преобладании корней лиственных пород 70 % корней ели сосредоточены в слое 0–10 см, в то время как доля корней березы и осины в этом горизонте составляет всего 37 % [13].

Приведенные выше черты сходства и различия структуры корневой массы смешанных насаждений зависят от путей их формирования [18, 19], а также от типов эволюционной и экологической стратегии древесных пород [16].

В условиях среднетаежной подзоны Северо-Запада России выяснение закономерностей размещения и взаимодействия активных корней в смешанных производных насаждениях, составляющих преобладающую часть продуктивного лесного фонда, важно для понимания формирования производительности древостоев и обоснования методов ведения хозяйства в них. Цель – изучить корневую конкуренцию между лиственными породами и елью, рассмотреть связь между подземной и надземной частями древостоя.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследование выполнено в производных 70-летних насаждениях III класса бонитета черничного типа леса на пробных площадях (ПП), заложенных в 1982 г. при проведении реконструктивных рубок с уборкой верхнего полога в 2-ярусных лиственно-еловых древостоях [10]. В составе сформировавшегося за 35 лет после рубки ельника (ПП 4) присутствует примесь лиственных пород (до 10 %), неравномерно распределенных по площади; общий запас древостоя превышает 300 м<sup>3</sup>/га. На контроле (ПП 1) запас ели равен в среднем 53 м<sup>3</sup>/га, а запас осиново-березового яруса, под пологом которого находится ель, составляет более 380 м<sup>3</sup>/га. Численность ели пересчетного размера (более 4 см на высоте 1,3 м) в обоих вариантах около 1,2 тыс. шт./га. Размещение деревьев на ПП было закартировано, деревья пронумерованы, что позволило получить информацию о пространственной неоднородности характеристик биогеоценоза. На ПП периодически выполняли измерение диаметров и высот для оценки динамики прироста, а также определяли мощность органогенных горизонтов почвы.

Почва на момент закладки ПП характеризовалась как грубогумусная среднеподзолистая супесчаная на валунной супеси. В первые годы после удаления лиственного полога (ПП 4) местами сформировался дерновый горизонт, но по мере смыкания крон ели и элиминации злакового покрова подстилка снова стала грубогумусной. Ее мощность незначительно сократилась сразу после рубки, затем непрерывно увеличивалась по мере смыкания крон и роста запаса ели и в 2018 г. характеризовалась средней толщиной 5,8 см. Вследствие преобладания хвойного опада подстилка отличается высокой кислотностью (рН 2,6–4), широким отношением C/N – 32–38. В почвенном профиле под подстилкой выделяется переходный органо-минеральный горизонт, имеющий характерные признаки оподзоливания [1]. На контроле в связи с существенным увеличением низового опада лиственных мощность подстилки за время наблюдений выросла не так значительно – до 3,6 см [1]. Кислотность подстилки здесь заметно меньше (рН 4,8), отношение C/N существенно уже – 22,6. Таким образом, процессы минерализации органических веществ в сформировавшемся ельнике замедлены по сравнению с контролем.



Состав и обилие живого напочвенного покрова после рубки существенно менялись вслед за развитием древостоя. Под пологом сформировавшегося после рубки ельника общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса незначительно выше, чем на контроле (26 и 20 % соответственно), но черники в его составе вдвое больше (17 и 9 % соответственно). Под пологом ельника развился преобладающий по площади моховой покров – 42 % по сравнению с 1 % на контроле, – представленный в основном плеуроциумом Шребера и хилокомиумом блестящим.

Для определения массы корней на каждой ПП отбирали по 10 равномерно размещенных по территории почвенных монолитов размером 10×10×20 см, замеряя при этом мощность лесной подстилки, а также диаметры живых деревьев в радиусе 5 м от пробы и расстояние до них. Корни древесных пород диаметром до 3 мм извлекали отдельно из лесной подстилки и минерального слоя почвы. Разделяли еловые корни и корни лиственных пород и сортировали их по фракциям: диаметром менее 1 мм и 1–3 мм. Образцы высушивали при температуре 105 °С до абсолютно сухой массы и взвешивали на аналитических весах Ohaus PX224. При анализе полученных данных учитывали пространственную неоднородность состава и запаса древостоев (табл. 1).

Таблица 1

**Характеристика древостоя по данным круговых площадок**  
**Characteristics of stands according to the measurements from the circular plots**

Древостой	Густота ели, тыс./га	Общий запас, м <sup>3</sup> /га	Вариативность запаса, %	Текущий прирост, м <sup>3</sup> /га	Состав древостоя, ед. запаса		
					Б	Ос	Е
<i>ПП 1</i>							
С преобладанием: березы	1,40	347	14	5,9	6,2	1,6	2,2
осины	1,15	475	19	12,9	1,0	6,9	2,1
<i>ПП 4</i>							
Чистый	1,44	297	18	9,1	0,1	0,5	9,4
Смешанный	1,59	417	30	13,2	0,4	3,4	6,2

Локальные значения плотности древостоя оценивали по данным измерения диаметров деревьев вокруг мест взятия почвенных монолитов. В качестве показателей оценки использовали сумму площадей сечений и сумму углов визирования на окружающие деревья из центра круга радиусом 5 м. Величина угла визирования (рад.) на каждое дерево определена через тангенс угла, равный отношению диаметра дерева к расстоянию до центра круга. Сумма центральных углов учитывает, кроме размеров окружающих деревьев, и расстояние до каждого из них; она неоднозначно связана с абсолютной полнотой и характеризует напряженность конкурентного давления окружающих деревьев [32]. Текущий среднепериодический прирост деревьев на круговых площадках найден как разница в объемах стволов, вычисленных на основании точных измерений диаметров в год обследования и за 5 лет до этого и путем построения графиков высот с применением местных таблиц. Сходная методика оценки корневой



конкуренции через отношение прироста к расстоянию до центра площадки реализована в исследованиях С.Н. Санникова с соавторами [7]. Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с использованием программ пакета Statistica 10.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Общая масса корней древесных пород диаметром до 3 мм в лиственнично-еловом (ПП 1) и еловом (ПП 4) древостоях в среднем по объекту примерно одинакова и составляет около 3,7 т/га (табл. 2). Преобладание корней одной древесной породы в их общей массе в значительной мере определяется доминированием породы в составе древостоя. В целом в пределах обеих ПП соотношения массы тонких корней довольно близки к соотношениям запасов ели и лиственных пород. В ельнике, где участие осины и березы в общем запасе составляет в среднем 20 %, масса корней ели в 4,6 раза больше массы корней лиственных пород, а в 2-ярусном лиственнично-еловом насаждении при 7-кратном преобладании лиственных в составе древостоя масса их тонких корней выше, чем у ели, в 5 раз, это может быть связано с ее угнетенным положением. Такие данные позволяют говорить о более высокой активности лиственных пород в освоении почвенных ресурсов, что отмечалось ранее в работах, посвященных изучению межвидовой конкуренции корневых систем [31, 38].

Таблица 2

**Масса корней диаметром до 3 мм в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, т/га**  
**Root mass under 3 mm in diameter in the upper 20 cm layer of soil, t/ha**

ПП	Ель			Лиственные породы			Всего
	лесная подстилка	минеральный слой	итого	лесная подстилка	минеральный слой	итого	
1	0,17±0,05	0,45±0,12	0,62±0,15	0,85±0,17	2,30±0,38	3,15±0,35	3,77
4	1,29±0,20	1,76±0,36	3,05±0,50	0,31±0,08	0,35±0,09	0,66±0,12	3,71

Масса корней диаметром до 3 мм по глубине распределяется следующим образом. На контроле ее большая часть (73 %) сосредоточена в минеральном слое почвы (табл. 2), что относится к корням как ели, так и лиственных пород. В еловом насаждении в минеральном слое находится 58 % корней ели и 53 % корней лиственных пород. Это различие может быть объяснено качественно иным составом опада и более интенсивным разложением подстилки в лиственнично-еловом насаждении и поступлением в нижележащие горизонты продуктов разложения, за которыми должны проникать корни всех деревьев.

В ряде публикаций отмечалось, что для смешанных древостоев с участием различных древесных пород характерно такое разделение корней по почвенной толще, при котором большая часть корней ели занимает верхние слои почвы, а корни березы находятся в нижележащих минеральных горизонтах [27, 39]. Однако анализ полученных данных указывает на то, что в изучаемых лесорастительных условиях по причине общей ограниченности доступного для освоения корневыми системами слоя почвы и концентрации в нем питательных веществ, а также из-за особенностей водно-воздушного режима корни лиственных пород и ели занимают одну и ту же экологическую нишу, конкурируя внутри нее.

Основную роль в поглощении питательных веществ из почвы играют физиологически активные корни до 1 мм. В минеральном слое почвы лиственнично-елового древостоя их доля от общей массы (69 %) незначительно отличается от доли тонких корней отдельно по породам (74 % корней ели и 69 % корней лиственных). Более значительны отличия в древостое с преобладанием ели – причем варьирование между елью и лиственными в этом случае шире (62 и 47 % соответственно) что, по-видимому, объясняется доминирующим положением ели (табл. 3).

Таблица 3

**Масса корней диаметром до 1 мм в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, т/га**  
**Root mass under 1 mm in diameter in the upper 20 cm layer of soil, t/ha**

ПП	Ель			Лиственные породы			Всего
	лесная подстилка	минеральный слой	итого	лесная подстилка	минеральный слой	итого	
1	0,07±0,03	0,20±0,05	0,27±0,07	0,52±0,12	1,14±0,25	1,66±0,27	1,93
4	0,61±0,11	0,99±0,19	1,60±0,27	0,16±0,05	0,14±0,04	0,30±0,08	1,90

На основании полученных средних по насаждению данных о совместном использовании корнями ели и лиственных пород одного почвенного слоя с учетом общеизвестной теневыносливости ели можно было бы считать уход за ней неактуальным. Однако пространственная структура лиственнично-еловых насаждений в силу целого комплекса естественных и антропогенных факторов неоднородна, и в местах локального преобладания какой-либо породы по-разному должны проявляться взаимоотношения видов в растительном сообществе, что необходимо учитывать при планировании ухода за елью.

Анализ характеристики древостоя на круговых площадках, заложенных вокруг мест взятия почвенных монолитов, позволил выделить внутренне сходные по составу древостоя и запасу совокупности площадок (см. табл. 1). Между этими совокупностями обнаружены различия в содержании тонких корней ели (табл. 4), которые зависят в ельнике от наличия примеси лиственных, а в лиственнично-еловом древостое – от преобладающей в верхнем ярусе породы.

Для елового древостоя можно констатировать статистически достоверное 2–3-кратное снижение массы тонких корней ели в случае присутствия 20–40 % лиственных пород в его составе. В лиственнично-еловом насаждении на площадках с преобладанием осины средняя масса тонких корней ели для всех фракций оказалась заметно большей в основном за счет их присутствия в лесной подстилке.

Существуют данные о том, что влияние опада на почвенную микрофлору реализуется в том числе за счет предотвращения потери почвенной влаги и уравнивания температуры почвы [34]. В частности, опавшие листья осины при их достаточном количестве за зиму слипаются между собой и образуют плотный слой, который, видимо, создает благоприятный микроклимат для корней ели. Мощность подстилки существенно влияет на долю находящихся в ней тонких корней [39]. В среднем в пределах всех выделенных в эксперименте вариантов породного состава (см. табл. 1) теснота положительной связи этих показателей характеризуется коэффициентами корреляции  $r = 0,65–0,75$  для обеих фракций (0–1 и 1–3 мм) и ели, и лиственных пород.

Таблица 4

**Средняя масса тонких корней ели в почве под древостоями разного состава**  
**Mean weight of fine spruce roots in the soil beneath stands of different composition**

Древостой	Масса корней ± ошибка, т/га						Всего
	лесная подстилка			минеральный слой			
	толщина корней, мм						
	0–1	1–3	0–3	0–1	1–3	0–3	
<i>III 1</i>							
С преобладанием:							
березы	0,04 ± ± 0,02	0,03 ± ± 0,02	0,07 ± ± 0,03	0,19 ± ± 0,09	0,21 ± ± 0,08	0,40 ± ± 0,18	0,47 ± ± 0,19
осины	0,10 ± ± 0,04	0,14 ± ± 0,04	0,24 ± ± 0,07	0,21 ± ± 0,05	0,27 ± ± 0,15	0,48 ± ± 0,17	0,72 ± ± 0,22
t-критерий различий	1,2	2,6	2,3	0,2	0,3	0,3	0,8
<i>III 4</i>							
Чистый	0,76 ± ± 0,15	0,83 ± ± 0,20	1,59 ± ± 0,25	1,33 ± ± 0,14	1,08 ± ± 0,26	2,42 ± ± 0,37	4,01 ± ± 0,48
Смешанный	0,39 ± ± 0,07	0,46 ± ± 0,18	0,85 ± ± 0,23	0,47 ± ± 0,25	0,31 ± ± 0,13	0,77 ± ± 0,31	1,62 ± ± 0,39
t-критерий различий	2,3	1,4	2,2	3,0	2,6	3,4	3,8

Распределение общей массы тонких корней по слоям почвы имеет особенности в местах локального преобладания разных пород. На контроле вне зависимости от состава древостоя около 27 % приходится на подстилку и 73 % – на минеральный слой. В чистом ельнике в подстилке сосредоточено 39 %, а в смешанном – 54 % корневой массы, причем минеральный слой осваивается преимущественно корнями ели, присутствие которых в нем в 2–8 раз выше, чем корней лиственных. Происходит это в основном за счет физиологически активных (до 1 мм) корней, которые во всех вариантах породного состава тяготеют к минеральному слою и лишь в елово-лиственных группах распределяются между подстилкой и минеральным слоем примерно одинаково.

Для выяснения структуры межвидовых конкурентных отношений была исследована связь массы тонких корней с рядом параметров древостоя и мощностью лесной подстилки (табл. 5). Основное внимание уделялось массе корней ели – целевой породы при лесовыращивании, поэтому в качестве определяющей характеристики древостоя принят текущий среднепериодический прирост ели (м<sup>3</sup>/га/год), предположительно, учитывающий погодичные колебания массы физиологически активных органов. Суммы центральных углов визирования на деревья ели и лиственных пород выражают степень их конкурентного влияния в точках отбора почвенных монолитов. Общий запас насаждения является интегральным показателем реализации потенциального почвенного плодородия. Доля участия основных пород в составе древостоя включена в перечень факторов влияния по причине явных различий как на уровне древостоя, так и в пределах вариантов породного состава. Мощность подстилки учтена как диагностический показатель почвы, связь с которым выявлена ранее на уровне совокупностей площадок с преобладанием различных древесных пород. Некоторые из перечисленных параметров коррелируют между собой, однако значимые связи есть только для отдельных групп, но не для всего массива данных.

Таблица 5

**Связь массы тонких корней ели с характеристиками насаждения**  
**The relationship of spruce fine root mass to characteristics of stands**

Фактор влияния	Коэффициенты корреляции с массой корней ели						Всего
	лесная подстилка			минеральный слой			
	толщина корней, мм						
	0–1	1–3	0–3	0–1	1–3	0–3	
Сумма углов:							
Е	0,31	0,32	0,35	0,35	0,11	0,25	0,31
Б+Ос	–0,80	–0,69	–0,81	–0,76	–0,57	–0,71	–0,81
Доля в составе древостоя:							
Б	<i>–0,54</i>	<i>–0,53</i>	<b>–0,59</b>	–0,45	–0,35	<u>–0,43</u>	<i>–0,53</i>
Е	<b>0,80</b>	<b>0,66</b>	<b>0,79</b>	<b>0,75</b>	<u>0,53</u>	<b>0,69</b>	<b>0,78</b>
Ос	–0,46	–0,31	–0,42	–0,48	–0,32	<u>–0,43</u>	<i>–0,45</i>
Общий запас	–0,31	–0,23	–0,29	–0,37	–0,35	–0,38	–0,37
Текущий прирост ели	<b>0,78</b>	<b>0,65</b>	<b>0,78</b>	<b>0,66</b>	<u>0,42</u>	<b>0,58</b>	<b>0,71</b>
Мощность подстилки	0,33	0,48	0,46	0,13	0,20	0,18	0,31

Примечание: полужирным шрифтом выделены показатели значимые на уровне  $p < 0,01$ ; курсивным –  $p < 0,05$ ; подчеркнутым –  $p < 0,10$ .

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют, что масса тонких корней ели для всех фракций и всего 20-сантиметрового слоя почвы наиболее тесно и существенно связана с конкурентным влиянием лиственных пород, долей ели в составе древостоя и ее среднепериодическим текущим приростом. Отрицательное воздействие березы несколько более существенно по сравнению с осинкой. Влияние мощности подстилки сказывается положительно в основном на массе корней диаметром более 1 мм, общего запаса – недостоверно и отрицательно в связи с тем, что лиственные породы эффективнее осваивают почвенные ресурсы и в результате угнетающее воздействие лиственного яруса превалирует.

Положительное влияние близости и размера деревьев (суммы углов визирования) ели согласуется с известными данными о концентрации основной массы корней ели на расстоянии 2–3 радиусов кроны [8], или 5,5–6 м [33], от ствола. Низкая статистическая значимость показателя связи в данном случае является, по-видимому, следствием скопления кислого хвойного опада и развития мохового покрова в местах более густого стояния деревьев ели [1]. То есть на распределении корней ели по площади существенно сказывается неоднородность лесорастительных свойств почвенного покрова, элиминирующая значимость расстояния до ближайших деревьев. Таким образом, из-за ограниченности горизонтального распространения активные корни должны занимать ближайшие доступные и наиболее благоприятные по содержанию питательных веществ ниши, что справедливо как для елового, и так лиственно-елового древостоя.

### Заключение

Результаты сравнительного изучения пространственного распределения массы тонких корней в верхнем 20-сантиметровом слое почвы в лиственненно-еловом и еловом древостоях свидетельствуют о существенности корневой конкуренции между елью и лиственными породами. Она заключается во взаимовлиянии пород на фоне варьирующих лесорастительных свойств почвенного субстрата, зависящих, в свою очередь, от состава и сомкнутости крон древостоя.

Выполненное исследование взаимодействия ели и лиственных пород в корнеобитаемом слое почвы подтверждает необходимость своевременного проведения ухода за елью в лиственненно-еловых насаждениях, который на практике традиционно осуществляется в более поздние периоды формирования, как в ожидании увеличения численности ели, так и вследствие ее успешной выживаемости под пологом лиственных. Однако с наступлением возраста приспевания преобладающих по запасу лиственных пород (30 лет – осина, 50 – береза) исчезают формальные основания для проведения рубок ухода, после чего ближайшим возможным мероприятием становится рубка спелого древостоя. В то же время, этот период является последним, когда еще возможно, выполнив окупаемую рубку лиственных, улучшить условия для развития корневых систем ели и обеспечить тем самым формирование устойчивого ельника. Более позднее проведение рубки спелых, а чаще уже перестойных лиственненно-еловых насаждений с попыткой сохранения ели, как правило, сопровождается сильным отпадом.

Выявленные различия массы активных корней ели при ее совместном произрастании рядом с березой и осиной дают основания для оказания предпочтений в отборе деревьев в рубку при проведении ухода в лиственненно-еловых древостоях. При прочих равных условиях по соседству с елью целесообразнее оставлять осину, в присутствии которой корни ели менее угнетены. Существенные различия в массе корней ели в чистом и смешанном ельнике указывают на необходимость по возможности максимального освобождения ели от непосредственного влияния лиственных пород при проведении ухода за насаждением. Это позволит достичь оптимального размещения пород в лиственненно-еловых древостоях и обеспечить формирование насаждений, наилучшим образом сочетающих выполнение экосистемных функций с высокой продуктивностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахмет О.Н., Синькевич С.М. Ускоренное выращивание ели II яруса – перспективы и ограничения // Научные основы устойчивого управления лесами: материалы II Всерос. науч. конф. (с междунар. участием), Москва, 25–27 окт. 2016 г. М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. С. 70–71.

Bakhmet O.N., Sinkevich S.M. Accelerated Growing of II Tier Spruce – Perspectives and Limitations. *Scientific Foundations of Sustainable Forest Management: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation, Moscow, October 25–27, 2016*. Moscow, CEPF RAN Publ., 2016, pp. 70–71. (In Russ.).

2. Бобкова К.С. Еловые леса // Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2001. С. 52–67.

Bobkova K.S. Spruce Forest. *Bioproduction Process in the Forest Ecosystems of the North*. Ed. by K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Sankt Petersburg, Nauka Publ., 2001. pp. 52–67. (In Russ.).

3. Кайрюкитис Л.А., Каразия С.П. Особенности восстановительной смены в лиственных с елью древостоях // Лесоведение. 1970. № 4. С. 3–12.

Kajrjkshtis L.A., Karazija S.P. Specifics of Regeneration Change in Deciduous Stands with Spruce. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1970, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).

4. Карпечко А.Ю. Влияние разреживания на корненасыщенность почвы еловых древостоев южной Карелии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 3. С. 19–25.

Karpechko A.Yu. Influence of Thinning on Root Saturation of Spruce Stands Soil in Southern Karelia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 3, pp. 19–25. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/9f4/9f4207f441288c959efe03be9636d950.pdf>

5. Орлов А.Я. Метод определения массы корней деревьев в лесу и возможность учета годовичного прироста органической массы в толще лесной почвы // Лесоведение. 1967. № 1. С. 64–70.

Orlov A.Ya. Method for Determining the Mass of Tree Roots in Forest Areas and the Possibility of Considering the Annual Increase in Organic Matter in Forest Soil Thickness. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1967, no. 1, pp. 64–70. (In Russ.).

6. Рахтеенко И.Н. Корневое питание ели и березы при взаимодействии их корневых систем // Изв. АН БССР. Сер.: Биол. науки. 1981. № 3(5-8). С. 123.

Rakhteyenko I.N. Spruce and Birch Root Nutrition During Interaction of Their Root Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Biological Series*. Belarus, 1981, no. 3(5-8), p. 123. (In Russ.).

7. Санников С.Н., Санникова Н.С. Лес как подземно-сомкнутая дендроценоэкосистема // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 25–34.

Sannikov S.N., Sannikova N.S. Forest as Underground-Closed Dendrocenoecosystem. *Sibirskii lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 1, pp. 25–34. (In Russ.).

8. Сеннов С.Н. Рубки ухода за лесом и внутривидовая конкуренция // Восстановление и мелиорация лесов Северо-Запада РСФСР. Л.: ЛенНИИЛХ, 1980. С. 17–27.

Sennov S.N. Thinning and Intraspecific Competition. *Reforestation and Melioration of Forest in Northwest RSFSR*. Leningrad, LenNIIFLH Publ., 1980. pp. 17–27. (In Russ.).

9. Сеннов С.Н. Лесоведение и лесоводство. М.: Академия, 2005. 256 с.

Sennov S.N. *Silvics and Silviculture*. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 256 p. (In Russ.).

10. Синькевич Т.А., Синькевич С.М. Комплексный уход в лиственно-еловых лесах Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1991. 136 с.

Sinkevich T.A., Sinkevich S.M. *Complex Thinning in the Deciduous-Spruce Forests of Karelia*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1991. 136 p. (In Russ.).

11. Сукачев В.Н. Опыт экспериментального изучения межбиотипной борьбы за существование у растений // Тр. Петергоф. биол. ин-та Ленингр. ун-та. 1935. № 15. С. 69–88.

Sukachev V.N. Experimental Study of Interbiotic Competition for Existence in Plants. *Proceedings of the Petergofskogo biologichogo instituta Leningradskogo universiteta*. 1935, no. 15, pp. 69–88. (In Russ.).

12. Сукачев В.Н. О внутривидовых и межвидовых взаимоотношениях среди растений // Ботан. журн. 1953. Т. 38, № 1. С. 57–96.

Sukachev V.N. On Intraspecific and Interspecific Interrelations Among Plants. *Botanicheskiy zhurnal*, 1953, vol. 38, no. 1, pp. 57–96. (In Russ.).

13. Терехов Г.Г., Усольцев В.А. Морфоструктура насаждений и корненасыщенность ризосферы культур ели сибирской и вторичного лиственного древостоя на Среднем Урале как характеристика их конкурентных отношений // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27, № 3-4. С. 330–335.

Terekhov G.G., Usoltsev V.A. Morphostructure and Root Saturation in Rhizosphere of Siberian Spruce and Secondary Deciduous Stands in the Middle Urals as a Property of Their Competitive Relationships. *Khvoynyye boreal'noy zony* = Conifers of the Boreal Area, 2010, vol. 27, no. 3-4, pp. 330–335. (In Russ.).

14. Усольцев В.А. В подвалах биосферы: что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? // Эко-потенциал. 2018. № 4(24). С. 25–79.



Usoltsev V.A. In the Basements of Biosphere: What Do We Know About the Primary Output of Tree Roots? *Eko-potentsial* = Eco-potential, 2018, no. 4(24), pp. 25–79. (In Russ.).

15. Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 147 с.

Usoltsev V.A., Zalesov S.V. *Methods for Determining Biological Productivity of Stands*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2005. 147 p. (In Russ.).

16. Чертов О.Г., Комаров А.С., Быховец С.С., Бхатти Дж.С. Различия экологических стратегий хвойных пород в европейских и канадских бореальных лесах: модельный анализ // Биосфера. 2015. Т. 7, № 3. С. 328–346.

Chertov O.G., Komarov A.S., Bykhovets S.S., Bhatti Dzh.S. Difference in the Ecological Strategies of Coniferous Tree Species in European and Canadian Boreal Forests: A Modeling Analysis. *Biosfera*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 328–346. (In Russ.). <https://doi.org/10.24855/biosfera.v7i3.89>

17. Чибисов Г.А. Рост корневых систем в березово-еловых насаждениях и влияние на них рубок ухода // Сб. работ по лесному хозяйству и лесохимии. Архангельск: Сев.-зап. кн. изд-во, 1971. С. 121–130.

Chibisov G.A. Growth of Root Systems in Birch and Spruce Forests and Influence of Harvesting on Those. *Proceedings on Forestry and Forest Chemistry*. Arkhangelsk, Severozapadnoye knizhnoye izdatel'stvo Publ., 1971, pp. 121–130. (In Russ.).

18. Чибисов Г.А., Нefeldова А.И. Рубки ухода и фитоклимат. Архангельск: СевНИИЛХ, 2007. 266 с.

Chibisov G.A., Nefedova A.I. *Thinning and Phytoclimate*. Arkhangelsk, SevNIIFLH Publ., 2007. 266 p. (In Russ.).

19. Bergeron Y., Chen Han Y.H., Kenkel C.N., Leduc A.L., Macdonald S.E. Boreal Mixedwood Stand Dynamics: Ecological Processes Underlying Multiple Pathways. *Forestry Chronicle*, 2014, vol. 90, no. 2, pp. 202–213. <https://doi.org/10.5558/tfc2014-039>

20. Bolte A., Rahmann T., Kuhr M., Pogoda P., Murach D., Gadow K. Relationships Between Tree Dimension and Coarse Root Biomass in Mixed Stands of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Plant and Soil*, 2004, vol. 264, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047777.23344.a3>

21. Brassard B.W., Chen Han Y.H., Bergeron Y., Pare D. Differences in Fine Root Productivity Between Mixed- and Single-Species Stands: Fine Root Productivity in Boreal Forest. *Functional Ecology*, 2011, vol. 25, no. 1, pp. 238–246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01769.x>

22. Drexhage M., Colin F. Estimating Root System Biomass from Breast-Height Diameters. *Forestry*, 2001, vol. 74, no. 5, pp. 491–497. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.5.491>

23. Finer L., Ohashi M., Noguchi K., Hirano Y. Fine Root Production and Turnover in Forest Ecosystems in Relation to Stand and Environmental Characteristics. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 262, no. 11, pp. 2008–2023. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.042>

24. Godbold D.L., Fritz H-W., Jentschke G., Meesenburg H., Rademacher P. Root Turnover and Root Necromass Accumulation of Norway Spruce (*Picea abies*) are Affected by Soil Acidity. *Tree Physiology*, 2003, vol. 23, no. 13, pp. 915–921. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.13.915>

25. Helmisaari H.-S., Derome J., Nöjd P., Kukkola M. Fine Root Biomass in Relation to Site and Stand Characteristics in Norway Spruce and Scots Pine Stands. *Tree Physiology*, 2007, vol. 27, no. 10, pp. 1493–1504. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.10.1493>

26. Hofmann C.W., Usoltsev V.A. Modelling Root Biomass Distribution in *Pinus sylvestris* Forests of the Turgai Depression of Kazakhstan. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 149, no. 1-3, pp. 103–114. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00548-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00548-X)

27. Kalliokoski T. *Root System Traits of Norway Spruce, Scots Pine, and Silver Birch in Mixed Boreal Forests: An Analysis of Root Architecture, Morphology, and Anatomy. Dissertationes Forestales*. Finland, Finnish Society of Forest Science Publ., 2011. 67 p. <https://doi.org/10.14214/df.121>
28. Kalyan A.L., Van Rees K.C.J. Contribution of Fine Roots to Ecosystem Biomass and Net Primary Production in Black Spruce, Aspen, and Jack Pine Forests in Saskatchewan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, vol. 140, no. 1-4, pp. 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.08.019>
29. Lawrence D.J., Luckai N., Meyer W.L., Shahi C., Fazekas A.J., Kesanakurti P., Newmaster S. Distribution of White Spruce Lateral Fine Roots as Affected by the Presence of Trembling Aspen: Root Mapping Using Simple Sequence Repeat DNA Profiling. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42, no. 8, pp. 1566–1576. <https://doi.org/10.1139/x2012-082>
30. Lehtonen A., Palviainen M., Ojanen P., Kalliokoski T., Nöjd P., Kukkola M., Penttilä T., Mäkipää R., Leppälampi-Kujansuu J., Helmisaari H.S. Modelling Fine Root Biomass of Boreal Tree Stands Using Site and Stand Variables. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 359, pp. 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.023>
31. Mekontchou C.G., Houle D., Bergeron Y., Drobyshev I. Contrasting Root System Structure and Belowground Interactions Between Black Spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P) and Trembling Aspen (*Populus tremuloides* Michx) in Boreal Mixedwoods of Eastern Canada. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 2, p. 127. <https://doi.org/10.3390/f11020127>
32. Miina J., Pukkala T. Using Numerical Optimization for Specifying Individual-Tree Competition Models. *Forest Science*, 2000, vol. 46, no. 2, pp. 277–283.
33. Müller K.H., Wagner S. Fine Root Dynamics in Gaps of Norway Spruce Stands in the German Ore Mountains. *Forestry*, 2003, vol. 76, no. 2, pp. 149–158. <https://doi.org/10.1093/forestry/76.2.149>
34. Nilsson M.-C., Wardle D.A., Dahlberg A. Effects of Plant Litter Species Composition and Diversity on the Boreal Forest Plant-Soil System. *Oikos*, 1999, vol. 86, no. 1, pp. 16–26. <https://doi.org/10.2307/3546566>
35. Pei Y., Pifeng L., Wenhua X., Shuai O., Yiye X. Effect of Stand Age on Fine Root Biomass, Production and Morphology in Chinese Fir Plantations in Subtropical China. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 7, art. no. 2280. <https://doi.org/10.3390/su10072280>
36. Pinno B.D., Wilson S.D., Steinaker D.F., Van Rees K.C.J., McDonald S.A. Fine Root Dynamics of Trembling Aspen in Boreal Forest and Aspen Parkland in Central Canada. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, no. 710, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1051/forest/2010035>
37. Ruess R., Hendrick R., Burton A., Pregitzer K., Sveinbjornsson B., Allen M., Maurer G. Coupling Fine Root Dynamics with Ecosystem Carbon Cycling in Black Spruce Forests of Interior Alaska. *Ecological Monographs*, 2003, vol. 73, no. 4, pp. 643–662. <https://doi.org/10.1890/02-4032>
38. Schmid I. The Influence of Soil Type and Interspecific Competition on the Fine Root System of Norway Spruce and European Beech. *Basic and Applied Ecology*, 2002, vol. 3, no. 4, pp. 339–346. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00116>
39. Shanin V.N., Rocheva L.K., Shashkov M.P., Ivanova N.V., Moskalenko S.V., Burnasheva E.R. Spatial Distribution Features of the Root Biomass of Some Tree Species (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula* sp.). *Biology Bulletin*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 260–268. <https://doi.org/10.1134/S1062359015030115>
40. Spinnler D., Egli P., Korner C. Provenance Effects and Allometry in Beech and Spruce Under Elevated CO<sub>2</sub> and Nitrogen on Two Different Forest Soils. *Basic and Applied Ecology*, 2003, vol. 4, no. 5, pp. 467–478. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00175>

**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 624.164.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-113-125

## Использование армогрунта в конструкции устоев деревянного моста лесовозной автомобильной дороги

*А.М. Бургонутдинов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц.; Researcher ID: [HIZ-9787-2022](https://orcid.org/0000-0002-1028-4129),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1028-4129>*

*О.Н. Бурмистрова<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.;*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>*

*В.И. Клевко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; Researcher ID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>*

*Ю.К. Лицингер<sup>1</sup>, аспирант; Researcher ID: [HI-5947-2022](https://orcid.org/0000-0002-6534-4395),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6534-4395>*


<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский просп., д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; burgonutdinov.albert@yandex.ru, vlivkl@mail.ru<sup>✉</sup>, julia\_litz@mail.ru

<sup>2</sup>Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, д. 13, г. Ухта, Республика Коми, Россия, 169300; olga.burm@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.22 / Одобрена после рецензирования 23.04.22 / Принята к печати 26.04.22

**Аннотация.** Деревянные мосты традиционно довольно широко используются на лесовозных дорогах, несмотря на целый ряд недостатков, в основном связанных с невысокими долговечностью и огнестойкостью. Главным преимуществом деревянных мостов для лесовозных дорог является применение при строительстве и ремонте местных конструкционных материалов, что обуславливает низкую стоимость объекта. Однако традиционные конструкции устоев деревянных мостов требуют большого объема кондиционных дренирующих грунтов для отсыпки конусов, каменных материалов или железобетонных плит для укрепления конусов в целях защиты от размывов. Кроме того, для слабых грунтов используются свайные опоры, для сооружения которых необходима тяжелая строительная техника. Этих недостатков лишены армогрунтовые устои. Использование новых конструкций береговых опор позволит снизить стоимость строительства и повысить надежность работы конструкций. Цель работы – оценить возможность применения армогрунта в конструкции устоев деревянных мостов. Приведены результаты расчета устоя с использованием армированного грунта. Выполнены расчеты на нормативные нагрузки А11, Н11, а также лесовозного автопоезда. Для нахождения параметров лесовозного автопоезда осуществлены дополнительные исследования, позволившие определить марку автопоезда, оказывающего максимальную нагрузку на устой. Установлено, что максимальное усилие на устой оказывает нагрузка Н11, а минимальное – А11. Усилие от лесовозного автопоезда на базе автомобиля Iveco-AMT 633920 (6×6) значительно превышает воздействие от нормативной нагрузки А11, но немного меньше, чем усилие от нормативной нагрузки Н11. Расчеты устоя выполнены

© Бургонутдинов А.М., Бурмистрова О.Н., Клевко В.И., Лицингер Ю.К., 2023

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

методом конечных элементов с помощью программы Plaxis 2D по 2 группам предельных состояний и включали в себя определение внешней и внутренней устойчивости армогрунтового устоя, а также вертикальных и горизонтальных перемещений. При расчете внешней устойчивости получены коэффициенты устойчивости для 1-й схемы загрузки – 2,14, для 2-й – 1,44, что больше предельно допустимого значения – 1,375. В целом расчеты показали, что армогрунтовой устой по всем показателям соответствует требованиям нормативных документов.

**Ключевые слова:** армированный грунт, метод конечных элементов, мостовой устой, геосинтетические материалы, лесовозная дорога, деревянное мостостроение

**Для цитирования:** Бургонутдинов А.М., Бурмистрова О.Н., Клевеко В.И., Лицингер Ю.К. Использование армогрунта в конструкции устоев деревянного моста лесовозной автомобильной дороги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 113–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-113-125>

Original article

## Application of Reinforced Soil Foundations in the Construction of Wooden Bridge Abutments Along Logging Road

*Albert M. Burgonutdinov<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;*

*Researcher ID: [HIZ-9787-2022](https://orcid.org/0000-0002-1028-4129), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1028-4129>*

*Olga N. Burmistrova<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.;*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>*

*Vladimir I. Kleveko<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

*Researcher ID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>*

*Yulia K. Litsinger<sup>1</sup>, Postgraduate Student; Researcher ID: [HII-5947-2022](https://orcid.org/0000-0002-6534-4395),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6534-4395>*

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolsky, 29, Perm, 614990, Russian Federation; [burgonutdinov.albert@yandex.ru](mailto:burgonutdinov.albert@yandex.ru), [vlivkl@mail.ru](mailto:vlivkl@mail.ru), [julia\\_litz@mail.ru](mailto:julia_litz@mail.ru)

<sup>2</sup>Ukhta State Technical University, ul. Pervomaiskaya, 13, Ukhta, Komi Republic, 169300, Russian Federation; [olga.burm@mail.ru](mailto:olga.burm@mail.ru)

---

*Received on January 27, 2022 / Approved after reviewing on April 23, 2022 / Accepted on April 26, 2022*

---

**Abstract.** Wooden bridges have been used quite frequently on logging roads, regardless of their low durability and weak fire resistance. The preference is determined by the application of local materials in the construction and reparation, thus reducing the cost of the structure. However, the standard construction of the wooden bridge demands large amounts of conditioned draining bulk materials to support the cones, stone materials, or reinforced concrete slabs to protect against soil erosion. Besides, pile foundations are used on soft ground, involving heavy construction machinery. Reinforced soil foundations don't have disadvantages of this kind. The application of innovative mounds for coastal support may reduce construction costs and increase operational capability. The purpose of the study is to estimate the potential of reinforced soil foundations in the construction of wooden bridge abutments. The results of the calculation for an abutment using reinforced support are presented. The calculations were performed for the standard loads A11, N11, and a forwarder. Additional research was performed to determine the parameters for the forwarder. According to the results, a mark of the forwarder with the maximum load on the abutment was identified. The maximum applied



force was exerted by the load H11, and the minimum was A11. The stress from the timber truck Iveco-AMT 633920 (6×6) significantly exceeded the characteristic load A11, yet it was slightly lower compared to H11. The calculations for the abutment were done using the finite element method of the Plaxis 2D software. The parameters were limited to two groups of states. The calculations contained the external and internal stability factors along with the vertical and horizontal displacements of the reinforced structure. The external stability coefficient for the first loading scheme was 2.14; for the second loading scheme, it was 1.44. They exceed the permitted limit that is 1.375. In general, the results demonstrated that the reinforced soil abutment totally meets the requirements of the regulatory documents.

**Keywords:** reinforced soil, finite element method, bridge abutment, geosynthetics, logging road, wooden bridge construction

**For citation:** Burgonutdinov A.M., Burmistrova O.N., Kleveko V.I., Litsinger Yu.K. Application of Reinforced Soil Foundations in the Construction of Wooden Bridge Abutments Along Logging Road. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 3, pp. 113–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-113-125>

### *Введение*

На территории нашей страны находится около четверти лесов мира. Большие запасы древесины использовались и будут широко использоваться в будущем для всех видов строительства, в том числе для постройки мостов на лесовозных дорогах Европейского Севера, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Древесина как строительный материал имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими материалами – возобновляемость запасов, малая плотность, сравнительно высокие прочность и жесткость, легкая обрабатываемость и низкая стоимость [2, 3, 10–13]. Деревянные мосты разрешается применять на автомобильных дорогах общей сети IV и V категорий, на улицах и дорогах местного значения. На лесных магистралях возводят постоянные многопролетные деревянные мосты, на лесовозных ветках – постоянные и временные деревянные мосты. Общее количество деревянных мостов в России сравнительно невелико и составляет менее 1 % от общего количества мостов. Однако в некоторых регионах, таких как Архангельская область, Сибирь, их количество значительно больше – примерно 10–15 % [11].

Одним из основных требований к мостам на лесных дорогах, особенно временным, является снижение их стоимости. Этого можно достигнуть внедрением новых конструкций и материалов, например армированного грунта [5–9], что актуально для лесовозных дорог.

Армированный грунт представляет собой комбинацию из грунта и армирующих прослоек и работает примерно так же, как железобетон. Грунт обладает относительно высокой прочностью на сжатие, однако имеет низкую прочность на растяжение. Армирующие прослойки, в свою очередь, имеют высокую прочность на растяжение и отлично компенсируют недостатки грунта. Армирующие прослойки чаще всего выполняются в виде геосеток или геотканей. При уплотнении грунта засыпки его часть проникает сквозь отверстия армирующего материала, обеспечивая их надежное сцепление между собой. Так образуется условно монолитный армогрунтовый массив, способный воспринимать как горизонтальные, так и вертикальные нагрузки, что немаловажно при строительстве подпорных конструкций, в том числе мостовых устоев. Еще один плюс та-



кой конструкции – отличный дренаж, за счет чего влага не скапливается внутри конструкции устоя, что значительно увеличивает его срок службы. Таким образом, применение армогрунтовых подпорных стенок и устоев мостов позволяет создавать сравнительно дешевые и долговечные конструкции [9].

В настоящее время армогрунтовые устои широко используются в строительной практике [14–20], но преимущественно для железобетонных и металлических мостов. Цель работы – оценка возможности применения армогрунтовых устоев для деревянных мостов лесовозных дорог.

#### Объекты и методы исследования

Для проверки возможности использования армогрунта в береговых опорах была разработана конструкция устоя для однопролетного деревянного моста. Его общий вид приведен на рис. 1. Конструкция создана для типового проекта серии 3.503-36 «Деревянные мосты и трубы на автомобильных дорогах лесозаготовительных предприятий под утяжеленные автопоезда», Ленинград, 1975 г. Длина пролета – 6,0 м, расчетная длина пролета – 5,5 м, высота подходной насыпи – 4,0 м, габарит моста – Г-4,5. Типовая свайная опора была заменена на армогрунтовую с легкой деревянной облицовкой.

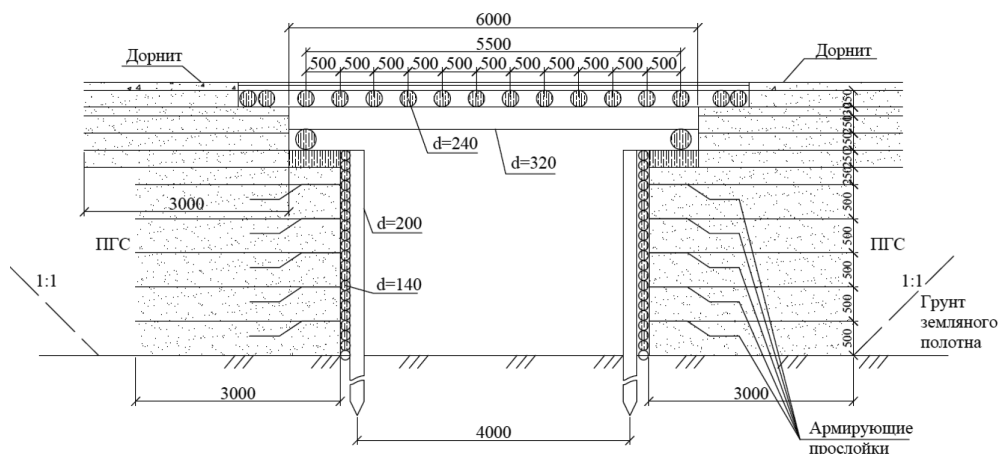


Рис. 1. Конструкция моста с армогрунтовыми устоями (ПГС – песчано-гравийная смесь; d – диаметр)

Fig. 1. Bridge construction with reinforced soil abutments (ПГС – sand and gravel mixture; d – diameter)

Инженерно-геологические условия и физико-механические характеристики грунтов и обратной засыпки армогрунтового устоя приняты по данным работы [5]. Материал засыпки – песок (объемный вес  $\gamma = 17,7$  кН/м<sup>3</sup>, угол внутреннего трения  $\phi = 35^\circ$ , модуль общей деформации  $E = 30$  МПа). Грунт земляного полотна – суглинок ( $\gamma = 19,9$  кН/м<sup>3</sup>,  $\phi = 21^\circ$ , удельное сцепление  $c = 23$  кПа,  $E = 26$  МПа). Основание – суглинок ( $\gamma = 19,9$  кН/м<sup>3</sup>,  $\phi = 21^\circ$ ,  $c = 23$  кПа,  $E = 26$  МПа) толщиной 1,2 м и гравийный грунт ( $\gamma = 19,9$  кН/м<sup>3</sup>,  $\phi = 40^\circ$ ,  $E = 45$  МПа).

Согласно СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» конструкция моста на лесной автомобильной дороге



разрабатывается по СП 35.13330–2011 «Мосты и трубы». В соответствии с этим документом деревянные мосты рассчитываются на нагрузки А11 и Н11. Однако пункт 6.6.12 СП 288.1325800.2016 предписывает в случае необходимости применять конкретные нагрузки, если их параметры превышают нагрузки типа АК и НК. Кроме того, 26.05.2022 подписано соглашение между правительством Пермского края и Ассоциацией «Лесопромышленники Прикамья», предусматривающее повышение допустимой массы транспортных средств, осуществляющих перевозку лесоматериалов, для 5-осных автопоездов до 44 тс, а для 6-осных и более автопоездов – до 55 тс. Поэтому нами были выполнены расчеты на нагрузки от конкретных автопоездов. Для определения характеристик транспортных средств, используемых при вывозке по путям первичного транспорта леса, взяты данные исследования [1]. В этом исследовании рекомендуются следующие марки и компоновочные решения автопоездов при плохом состоянии лесовозных автодорог: Iveco-AMT 633920 (6×6) + САВ 83433RC4-0000011-И, МАЗ 6317F9-565-000 (6×6) + МАЗ-837810-020, Урал 4320-82 (6×6) + НефАЗ-8332-09, Iveco-AMT 633920 (6×6) + САВ 83434-0000010-02, КамАЗ 6560 (8×8) + САВ 83433RC4-0000011-И, Volvo FMX (6×6) + САВ 83433RC4-0000011-И, Scania G 480 CB6X6EHZ (6×6) + САВ 83433RC4-0000011-И. Осевые нагрузки от лесовозных автопоездов и расстояния между осями приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Весовые и геометрические характеристики лесовозных автопоездов****Weight and geometric characteristics of the forwarders**

Марка автомобиля и прицепа	Нагрузка на ось, кН		Расстояние между осями, м		Общая масса автопоезда, кН
	автомобиля	прицепа	автомобиля	прицепа	
Iveco-AMT 633920 (6×6) + САВ 83433RC4-0000011-И	98,0+ +2×156,8	117,6+ +2×117,6	4,70+1,39	4,06+1,40	764,4
МАЗ 6317F9-565-000 (6×6) + МАЗ-837810-020	71,5+ +2×101,4	98,0+98,0	4,48+1,40	5,385	470,3
Урал 4320-82 (6×6) + НефАЗ-8332-09	60,0+ +2×76,8	107,8+ +107,8	4,83+1,40	6,50	429,2
Iveco-AMT 633920 (6×6) + САВ 83434-0000010-02	98,0+ +2×156,8	2×117,6+ +2×117,6	4,70+1,39	1,36+4,06+ +1,36	872,2
КамАЗ 6560 (8×8) + САВ 83433RC4-0000011-И	70,6+70,6+ +2×127,4	117,6+ +2×117,6	2,06+3,64+ +1,44	4,06+1,40	748,7
Volvo FMX (6×6) + САВ 83433RC4-0000011-И	98,0+ +2×127,4	117,6+ +2×117,6	3,70+1,40	4,06+1,40	705,6
Scania G 480 CB6X6EHZ (6×6) + САВ 83433RC4-0000011-И	83,3+ +2×127,4	117,6+ +2×117,6	4,50+1,35	4,06+1,40	690,9

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показал, что максимальное значение осевой нагрузки имеет автомобиль Iveco-AMT 633920 (6×6). Для мостов малых пролетов расстояние между осями практически не влияет на общее усилие на опору моста, так как на пролете помещается только задняя тележка. Поэтому для дальнейших расчетов был выбран автомобиль Iveco-AMT 633920 (6×6).

От пролетного строения моста на устой передаются постоянные нагрузки от веса пролетного строения и временные нагрузки от автомобильных нагрузок. При дальнейших расчетах использовано максимальное значение усилия.

Постоянная нагрузка от веса пролетного строения определена по типовому проекту серии 3.503-36 «Деревянные мосты и трубы на автомобильных дорогах лесозаготовительных предприятий под утяжеленные автопоезда», выпуск 2. Для пролета длиной 6,0 м и габаритом Г-4,5 объем необходимой древесины составляет 20,5 м<sup>3</sup>.

Временные нагрузки на пролетное строение были приняты по СП 35.13330–2011 «Мосты и трубы»: А11 и Н11. Кроме того, выполнены расчеты для тяжелых лесовозных автопоездов Iveco-АМТ 633920 (6×6) + САВ 83434-0000010-02. Расчетные схемы загрузки пролетного строения временной нагрузкой представлены на рис. 2.

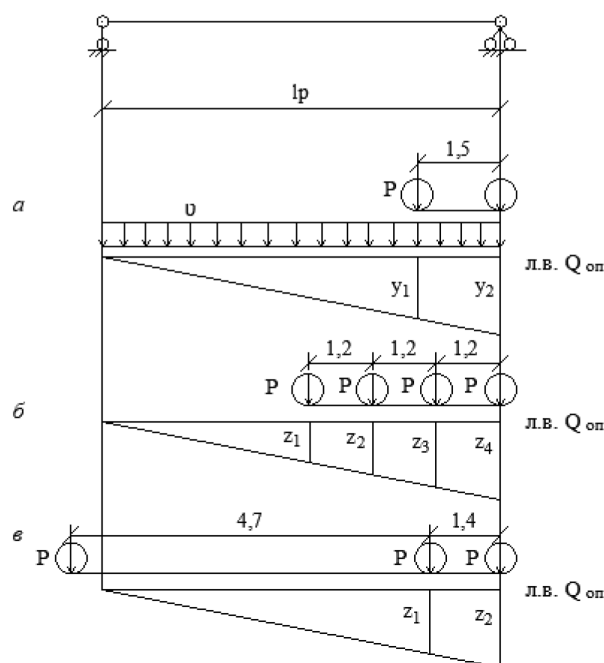


Рис. 2. Расчетные схемы загрузки пролетного строения: *a* – нагрузка А11; *б* – нагрузка Н11; *в* – лесовозный автопоезд (л.в.  $Q_{оп}$  – линия влияния поперечной силы на опоре)

Fig. 2. Computational load schemes for the bridge framework: *a* – the load А11; *б* – the load Н11; *в* – the a forwarder (л.в.  $Q_{оп}$  – the line of transverse force influence on the bridge support)

Нормативная вертикальная нагрузка, кН, на устой моста от собственного веса пролетного строения может быть определена по формуле

$$S_{св}^H = q_n \Omega_{лв},$$

где  $q_n$  – нормативная нагрузка от собственного веса конструкций пролетного строения, кН/м;  $\Omega_{лв}$  – полная площадь участков линии влияния;

$$q_n = V \gamma / l_p,$$

$V$  – общий объем древесины, требующейся на пролетное строение,  $V = 20,5$  м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – объемный вес древесины,  $\gamma = 6,9$  кН/м<sup>3</sup>;  $l_p$  – расчетная длина пролета,  $l_p = 5,5$  м;

$$q_n = 20,5 \cdot 6,9 / 5,5 = 25,7;$$

$$S_{св}^H = 25,7 \cdot 2,75 = 70,68.$$

Расчетная вертикальная нагрузка на устой моста от собственного веса пролетного строения:

$$S_{\text{св}}^{\text{р}} = \gamma_{\text{fq}} S_{\text{св}}^{\text{н}}$$

где  $\gamma_{\text{fq}}$  – коэффициент надежности для постоянной нагрузки,  $\gamma_{\text{fq}} = 1,2$  (табл. 6.4, СП 35.13330–2011);

$$S_{\text{св}}^{\text{р}} = 1,2 \cdot 70,68 = 84,81.$$

Нормативное вертикальное усилие, кН, на устой моста от нагрузки А11:

$$S_{\text{А11}}^{\text{н}} = v \Omega_{\text{лв}} + P (y_1 + y_2),$$

где  $v$  – равномерно распределенная часть нагрузки А11,  $v = 11$  кН/м;  $P$  – осевая нагрузка от 2-осной тележки нагрузки А11,  $P = 110$  кН;  $y_1 + y_2$  – ординаты линии влияния, расположенные под осями тележки (рис. 2, а);

$$S_{\text{А11}}^{\text{н}} = 11 \cdot 2,75 + 110 (0,73 + 1,0) = 220,55.$$

Расчетная вертикальная нагрузка, кН, на устой моста от нагрузки А11:

$$S_{\text{А11}}^{\text{р}} = v (1 + \mu) \gamma_{\text{fv}} \Omega_{\text{лв}} + P (1 + \mu) \gamma_{\text{fp}} (y_1 + y_2),$$

где  $1 + \mu$  – динамический коэффициент, для равномерно распределенной нагрузки  $(1 + \mu) = 1,0$  (п. 6.22 СП 35.13330–2011), для нагрузки от 2-осной тележки  $(1 + \mu) = 1,3$  (п. 6.22 СП 35.13330–2011);  $\gamma_{\text{fv}}$  – коэффициент надежности для равномерно распределенной части нагрузки А11,  $\gamma_{\text{fv}} = 1,25$  (табл. 6.10, СП 35.13330–2011);  $\gamma_{\text{fp}}$  – коэффициент надежности для 2-осной тележки нагрузки А11,  $\gamma_{\text{fp}} = 1,5$  (табл. 6.10, СП 35.13330–2011);

$$S_{\text{А11}}^{\text{р}} = 11 \cdot 1,0 \cdot 1,25 \cdot 2,75 + 110 \cdot 1,3 \cdot 1,5 (0,73 + 1,0) = 408,90.$$

Нормативная вертикальная нагрузка, кН, на устой моста от нагрузки Н11:

$$S_{\text{Н11}}^{\text{н}} = P (z_1 + z_2 + z_3 + z_4),$$

где  $P$  – осевая нагрузка от 4-осной тележки нагрузки Н11,  $P = 196$  кН;  $z_1 + z_2 + z_3 + z_4$  – ординаты линии влияния, расположенные под осями тележки (рис. 2, б);

$$S_{\text{Н11}}^{\text{н}} = 196 (0,35 + 0,56 + 0,78 + 1,0) = 527,24.$$

Расчетная вертикальная нагрузка, кН, на устой моста от нагрузки Н11:

$$S_{\text{Н11}}^{\text{р}} = \gamma_{\text{fp}} S_{\text{Н11}}^{\text{н}},$$

где  $\gamma_{\text{fp}}$  – коэффициент надежности для тележки нагрузки Н11,  $\gamma_{\text{fp}} = 1,1$  (табл. 6.10, СП 35.13330–2011);

$$S_{\text{Н11}}^{\text{р}} = 1,1 \cdot 527,24 = 579,96.$$

Нормативная вертикальная нагрузка, кН, от лесовозных автопоездов на устой моста:

$$S_{\text{т}}^{\text{н}} = P (z_1 + z_2),$$

где  $P$  – осевая нагрузка от 2-осной тележки автомобиля Iveco-АМТ 633920,  $P = 156,8$  кН;  $z_1 + z_2$  – ординаты линии влияния, расположенные под осями тележки (рис. 2, в);

$$S_{\text{т}}^{\text{н}} = 156,8 (0,75 + 1,0) = 274,4.$$

Расчетная вертикальная нагрузка, кН, от лесовозных автопоездов на устой моста:

$$S_{\text{т}}^{\text{р}} = P (1 + \mu) \gamma_{\text{fp}} (z_1 + z_2),$$

где  $\gamma_{\text{fp}}$  – коэффициенты надежности для 2-осной тележки,  $\gamma_{\text{fp}} = 1,5$ ;  $1 + \mu = 1,3$ ;

$$S_{\text{т}}^{\text{р}} = 156,8 \cdot 1,3 \cdot 1,5 (0,75 + 1,0) = 535,08.$$

Итоговые значения нагрузок на устой моста от пролетного строения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Нагрузки, кН, на устой от пролетного строения**  
**Loads, kN, on the abutment from the framework**

Нагрузка	Нагрузка		Суммарная нагрузка	
	нормативная	расчетная	нормативная	расчетная
Собственный вес пролета	70,68	84,81	–	–
A11	220,55	408,90	291,23	493,71
H11	527,24	579,96	597,92	664,77
Лесовоз Iveco-AMT 633920	274,40	535,08	345,08	619,89

Максимальную вертикальную нагрузку на устой моста имеет нагрузка H11, поэтому дальнейшие расчеты проведены для этой нагрузки.

К армирующим материалам, используемым в конструкциях устоев мостов, предъявляются особые требования по прочности на растяжение и деформативности. В настоящее время выпускается большое количество геотекстилей, удовлетворяющих этим требованиям: «Геоспан ТН», «Стабитекс», «Стабиленка», «Геолон РЕТ», «Армистаб», «Стабигрунт» и других марок.

В данной работе в качестве армирующего материала при расчетах выбран тканый геотекстиль «Геоспан ТН-80» производства предприятия ГК «Гекса», обладающий следующими физико-механическими характеристиками: поверхностная плотность – 410 г/м<sup>2</sup>; прочность при растяжении по длине и ширине – 80 кН/м; относительное удлинение при максимальной нагрузке по длине и ширине – не более 20 %.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Для расчетов армогрунтовых устоев можно использовать аналитические и численные методы. Аналитический метод предполагает выполнение расчетов в 2 этапа. Сначала выполняется расчет на общую устойчивость армогрунтовой удерживающей конструкции, а затем на внутреннюю устойчивость [7]. Аналитические расчеты предполагают большой объем вычислений с использованием итерационных процедур и имеют высокую трудоемкость, хотя существуют компьютерные программы, упрощающие эту работу [4]. Численные методы расчета менее трудоемки и позволяют точнее моделировать реальную конструкцию сооружения. Сравнение аналитических и численных методов расчета для армогрунтовых подпорных конструкций выявило хорошую сходимость результатов [6]. Поэтому расчет армогрунтового устоя был выполнен численным методом при помощи сертифицированного программного комплекса Plaxis 2D, в котором реализован метод конечных элементов. Plaxis 2D широко применяется для геотехнических расчетов.

При проектировании устоя моста выполнены следующие расчеты:

1. по 1-й группе предельных состояний:
  - расчеты на потерю общей (внешней) устойчивости сооружения (коэффициента устойчивости);
  - расчеты на внутреннюю устойчивость армогрунтовой конструкции (растягивающих усилий в армирующих элементах);
2. по 2-й группе предельных состояний – расчет вертикальных и горизонтальных деформаций.

Расчеты были выполнены для 2 случаев загрузки устоя временной нагрузкой Н11: 1) нагрузка расположена на пролетном строении; 2) на призме обрушения.  
 Расчетная схема приведена на рис. 3, деформированная схема – на рис. 4.

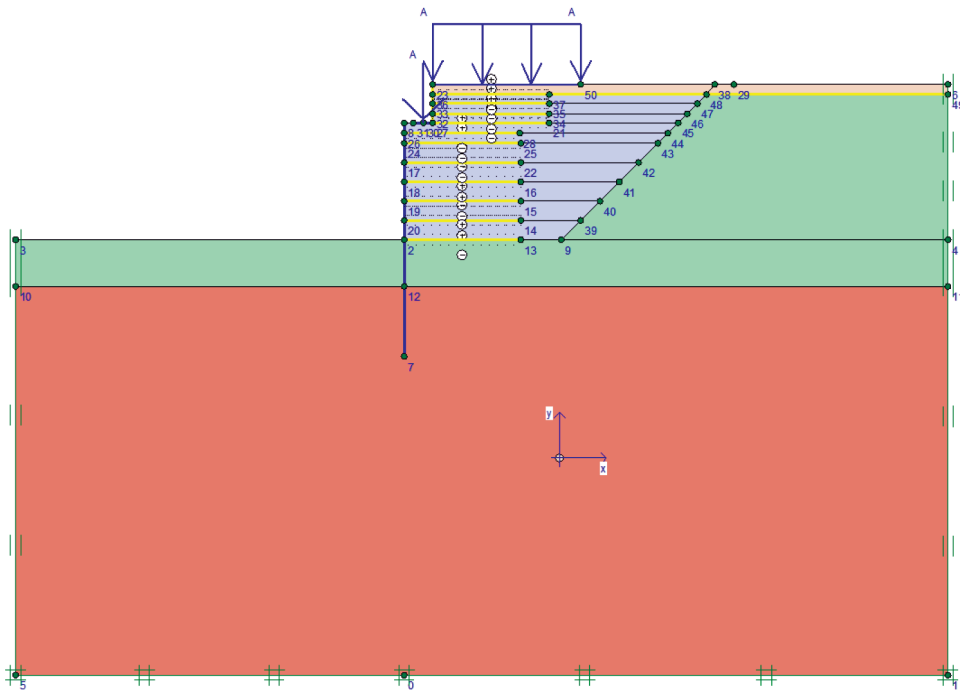


Рис. 3. Расчетная схема армогрунтового устоя (А – вертикальная нагрузка)

Fig. 3. Calculation scheme of the reinforced soil abutment (A – vertical load)

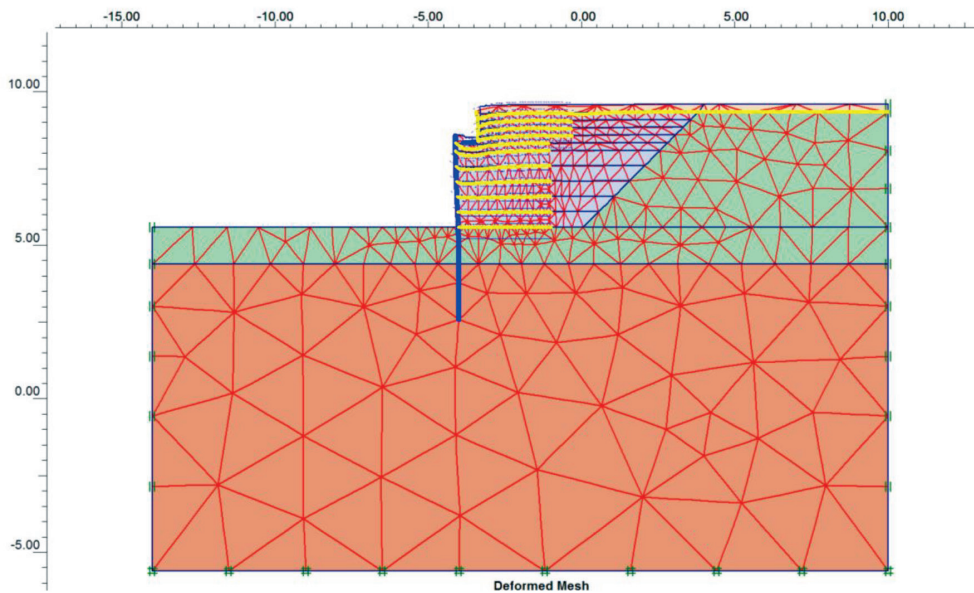


Рис. 4. Деформированная схема армогрунтового устоя по 1-й схеме загрузки.  
 Программа Plaxis 2D

Fig. 4. Scheme of deformation of the reinforced soil abutment according to the first loading scheme. Made in Plaxis 2D software

Результаты расчета по 1-й группе предельных состояний на общую устойчивость следующие: коэффициент устойчивости для 1-й схемы загрузки равен 2,14; для 2-й – 1,44.

В СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» величина коэффициента устойчивости конструкции против опрокидывания нормируется пунктом 5.4. Коэффициент устойчивости, определенный по формуле 5.1, составляет 1,375. Для армогрунтовых конструкций нормативный коэффициент запаса определяется в соответствии с пунктом 7.2.20. ОДМ 218.2.027–2012 «Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах» и составляет 1,31. Таким образом, полученный нами расчетный коэффициент устойчивости выше нормативных значений.

Результаты расчета предельных состояний на внутреннюю устойчивость по 1-й группе предельных состояний и расчета по 2-й группе предельных состояний сведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

**Результаты расчета по 1-й группе предельных состояний на внутреннюю устойчивость**

**Calculation results for the first group of the limit states of internal stability**

Номер армирующей прослойки (снизу вверх)	Растягивающие напряжения в армирующей прослойке, кН/м	
	для схемы загрузки	
	1	2
1	2,08	5,35
2	5,57	6,26
3	10,41	6,93
4	13,58	7,98
5	14,68	7,71
6	14,95	6,78
7	14,91	6,81
8	9,82	3,57
9	2,96	9,84
10	2,75	13,84

Таблица 4

**Результаты расчета по 2-й группе предельных состояний**

**Calculation results for the second group of the limit states**

Схема загрузки	Перемещение, мм	
	вертикальное	горизонтальное
1	78,77	37,30
2	46,10	47,51

При расчете армогрунтовых сооружений допустимый предел прочности для полимерных элементов определяется по пункту 7.2.14. ОДМ 218.2.027–2012 «Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах» и должен быть равен:



$$T_D = T_V / f_m,$$

где  $T_D$  – расчетная предельная нагрузка на армоэлемент, кН/м;  $T_V$  – предел прочности арматуры на растяжение, кН/м;  $f_m$  – коэффициент запаса материала для данной арматуры,  $f_m \leq 1,5$ .

Для арматуры «Геоспан ТН-80»  $T_D = 80/1,5 = 53,3$  кН/м, что существенно больше максимального усилия в армирующей прослойке, равного 14,85 кН/м.

В соответствии с требованиями пункта 11.1 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» основания и фундаменты мостов следует проектировать по СП 22.13330.2016. Предельные деформации основания фундаментов объектов нового строительства, согласно табл. Г1 пункта 2 СП 22.13330.2016, составляют 20 см для зданий и сооружений, в конструкциях которых не возникают усилия от неравномерных осадок, к таким конструкциям относятся и балочные мосты разрезной системы. Горизонтальные перемещения опор мостов по СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» для балочных деревянных мостов не регламентируются.

### Выводы

1. Анализ весовых и геометрических характеристик лесовозных автопоездов, применяемых на лесных дорогах, показал, что максимальную нагрузку на ось 156,8 кН оказывает автомобиль Iveco-АМТ 633920 (6×6).

2. Максимальное усилие на устой дает нормативная временная нагрузка Н11, а минимальное – А11. Усилие от лесовозного автопоезда на базе автомобиля Iveco-АМТ 633920 (6×6) значительно превышает воздействие от нормативной нагрузки А11, но немного меньше, чем усилие от нормативной нагрузки Н11. Поэтому при проектировании мостов на лесовозных дорогах необходимо проводить дополнительные расчеты на пропуск тяжелых лесовозных автопоездов.

3. Выполненные расчеты по 2 группам предельных состояний показали, что армогрунтовый устой по всем показателям соответствует требованиям нормативных документов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузнецов А.В. Анализ применения лесовозных автопоездов в реальных ареалах эксплуатации // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6, ч. 2. С. 265–269.

Kuznetsov A.V. Analysis of Using Log Trucks in Real Areas of Operation. *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* = Modern High Technologies, 2021, no. 6(2), pp. 265–269. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.38732>

2. Мищенко Д.С. Обзор деревянного мостостроения в России // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: сб. науч. тр. IV Всерос. науч.-практ. конф., 22 нояб. 2022 г. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. С. 363–366.

Mishchenko D.S. Review of Wooden Bridge Construction in Russia. *Innovative Methods for Engineering Projecting of Buildings and Constructions. Proceedings of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference, November 22, 2022*. Kursk, SWSU Publ., 2022, pp. 363–366. (In Russ.).

3. Подъяпольская М.А., Вербицкий И.О., Вербицкая Е.В. Деревянные мосты. Мостостроение с использованием древесины в прошлом и сейчас // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 168–170.

Podyapolskaya M.A., Verbitskiy I.O., Verbitskaya E.V. Wooden Bridges. Past and Present of Wood Bridge Constriction. *Polzunovskiy al'manakh*, 2022, no. 1, pp. 168–170. (In Russ.).

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015617003. Программный комплекс для расчета внешней устойчивости подпорных стен («Retaining Wall»): № 2015613701: заявл. 06.05.2015: опублик. 20.07.2015 / В.Д. Соколова, В.И. Клевко.

Sokolova V.D., Kleveko V.I. *Software Package for Calculating the External Stability of Retaining Walls («Retaining Wall»)*. Certificate of registration of the computer program RF, no. RU 2015617003, 2015. (In Russ.).

5. Соколова В.Д. Применение армогрунта в конструкции устоев моста на лесовозной дороге // Северогеоэкотех-2014: материалы междунар. молодеж. науч. конф., 26–28 марта 2014 г. Ч. 4. Ухта: УГТУ, 2014. С. 102–104.

Sokolova V.D. Application of Reinforcement Soil in the Construction of Bridge Abutments on the Logging Road. *Severogeoekotekh – 2014: Proceedings of International Young Scientists Conference, March 26–28, 2014. Part 4*. Ukhta, USTU Publ., 2014, pp. 102–104. (In Russ.).

6. Соколова В.Д. Сравнительный анализ результатов аналитического и численного методов расчета армогрунтовых подпорных стен // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам VIII науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, 23–26 апр. 2015 г.) / отв. ред. П.А. Белкин. Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 116–119.

Sokolova V.D. Comparative Analysis of the Results of Analytical and Numerical Methods for Calculating Reinforced Soil Retaining Walls. *Geology in the Developing World: Proceedings of the 8th Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists with International Participation, 23–26 April 2015*. Ed. by P.A. Belkin. Perm, PSU Publ., 2015, pp. 116–119. (In Russ.).

7. Соколова В.Д., Клевко В.И. Основные положения по расчету армогрунтового устоя моста // Будущее науки-2014: сб. науч. ст. II Междунар. молодеж. науч. конф., 23–25 апр. 2014 г. / отв. ред. А.А. Горохов. Т. 2. Курск: Унив. кн., 2014. С. 236–239.

Sokolova V.D., Kleveko V.I. Main Principles for Calculation of Reinforced Soil Bridge Abutment. *Future of Science – 2014: Proceedings of the 2nd International Young Scientists Conference, April 23–25, 2014*. Ed. by A.A. Gorokhov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2014, vol. 2, pp. 236–239. (In Russ.).

8. Соколова В.Д., Клевко В.И. Применение армированного грунта в конструкции устоев моста // Экология и науч.-техн. прогресс. Урбанистика. 2014. № 1. С. 367–373.

Sokolova V.D., Kleveko V.I. The Use of Reinforced Soil in the Construction of Bridge Abutments. *Ecology and Scientific-Technical Progress. Urbanistics: Proceedings of the 12th All-Russian Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists with International Participation*. Perm, 2014, no. 1, pp. 367–373. (In Russ.).

9. Соколова В.Д., Клевко В.И. Экономическое обоснование применения армированного грунта в конструкции устоев мостов // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы V междунар. науч.-практ. конф., North Charleston, SC, USA, 22–23 дек. 2014 г. Т. 1. CreateSpace, 2015. С. 85–88.

Sokolova V.D., Kleveko V.I. Economic Justification for the Use of Reinforced Soil in the Construction of Bridge Abutments. *Actual Directions of Fundamental and Applied Research: Proceedings of the 5th International Scientific-Practical Conference, North Charleston, SC, USA, 22–23 December 2014*. CreateSpace Publ., 2015, vol. 1, pp. 85–88. (In Russ.).

10. Стуков В.П. Современное деревянное мостостроение // Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения: материалы науч. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотр. и аспирантов Сев. (Арктич.) федер. ун-та им. М.В. Ломоносова, 19–26 марта 2015 г. Архангельск: САФУ, 2015. С. 343–348.

Stukov V.P. Modern Wooden Bridge Building. *Development of the North Arctic Region: Problems and Solutions. Proceedings of the Scientific Conference of the Professional and Teaching Supervisors, Research Assistants and Graduate Students of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, March 19–26, 2015*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015, pp. 343–348. (In Russ.).

11. Стуков В.П. Развитие деревянных мостов и их применение в условиях Севера // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 29–30 нояб. 2018 г. Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ, 2019. С. 316–321.

Stukov V.P. Development of Wooden Bridges and Their Application in the Conditions of the North. *Regional Aspects of the Development of Science and Education in the Fields of Architecture, Construction, Boundary Survey and Cadastres at the Beginning of the 3rd Millennium: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 29–30 November 2018*. Komsomolsk-on-Amur, KnASU Publ., 2019, pp. 316–321. (In Russ.).

12. Уткин В.А., Матвеев С.А. Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 126–152.

Utkin V.A., Matveev S.A. Features of Designing Wooden Bridges of the Forest Complex. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 126–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-126-152>

13. Цыганков А.В. Проектирование и расчет деревянных автодорожных мостов. Пермь: ПГТУ, 2007. 434 с.

Tsygankov A.V. *Projecting and Computation of Wooden Road Bridges*. Perm, PSU Publ., 2007. 434 p. (In Russ.).

14. Askari M., Razeghi H.R., Mamaghanian J. Numerical Study of Geosynthetic Reinforced Soil Bridge Abutment Performance Under Static and Seismic Loading Considering Effects of Bridge Deck. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, vol. 49, no. 5, pp. 1339–1354. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2021.05.007>

15. Jelušič P., Žlender B. Experimental Study of a Geosynthetic-Reinforced Soil Bridge Abutment. *Geosynthetics International*, 2021, vol. 28, no. 5, pp. 479–490. <https://doi.org/10.1680/jgein.21.00022>

16. Kupec J. Bridge Abutments from Geogrid Reinforced Soil. *NZ Geomechanics News*, 2021, iss. 102. Available at: <https://www.nzgs.org/libraries/bridge-abutments-from-geogrid-reinforced-soil/> (accessed 20.12.2022).

17. Tatsuoka F., Tateyama M., Koda M., Kojima K., Yonezawa T., Shindo Y., Tamai S. Research and Construction of Geosynthetic-Reinforced Soil Integral Bridges. *Transportation Geotechnics*, 2016, vol. 8, pp. 4–25. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.03.006>

18. Vennapusa P., White D., Klaiber W., Wang Sh. Geosynthetic Reinforced Soil for Low-Volume Bridge Abutments. Final Report. *Center for CEER at Iowa State University*. 2012. Available at: [https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/GRS-for-Low-Volume-Bridge-Abutments\\_TR621\\_FINAL\\_UPDATED\\_HQ.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/GRS-for-Low-Volume-Bridge-Abutments_TR621_FINAL_UPDATED_HQ.pdf) (accessed 20.12.2022).

19. Won M.-S., Langucyan C.P. A Study of the Effects of Geosynthetic Reinforced Soil and Reinforcement Length on GRS Bridge Abutment. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, iss. 23, art. no. 11226. <https://doi.org/10.3390/app112311226>

20. Zornberg J.G., Abu-Hejleh N., Wang T. Geosynthetic – Reinforced Soil Bridge Abutments. *Geotechnical Fabrics Report*, 2001, vol. 19, no. 2, pp. 52–55. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/290006229\\_Geosynthetic\\_-\\_Reinforced\\_soil\\_bridge\\_abutments](https://www.researchgate.net/publication/290006229_Geosynthetic_-_Reinforced_soil_bridge_abutments) (accessed 12.12.2022).

**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 629.1.04

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-126-139

## Оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда

**В.И. Посметьев**, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

**В.О. Никонов**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

**А.Ю. Мануковский**, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

**В.В. Посметьев**, канд. физ.-мат. наук, доц.; *ResearcherID*: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

**А.В. Авдюхин**, аспирант; *ResearcherID*: [HDM-3130-2022](https://orcid.org/0000-0003-2622-8946),


*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2622-8946>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru<sup>✉</sup>, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, 1988aav@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.22 / Одобрена после рецензирования 28.04.22 / Принята к печати 30.04.22

**Аннотация.** Рассмотрены преимущества использования в современных условиях вывозки лесоматериалов лесовозных автопоездов, составленных седельными тягачами с полуприцепами. Проанализированы последствия эксплуатации лесовозных автопоездов в сложных дорожных условиях, характеризующихся недостаточным обустройством лесовозных дорог. Описаны перспективные научные направления, позволяющие повысить эффективность работы лесовозных седельных автопоездов. Предложена усовершенствованная конструкция рекуперативного седельно-сцепного устройства, обеспечивающая повышение надежности и сокращение расхода топлива автопоезда, улучшение условий труда водителей, а также снижение динамических нагрузок между звеньями лесовозного автопоезда, возникающих при его движении в неустановившихся режимах. Методика проведения исследования включает в себя использование математического аппарата многофакторной оптимизации. Выведены аналитические формулы для определения показателей эффективности работы рекуперативного седельно-сцепного устройства. Выявлено влияние величины хода поршней гидравлического цилиндра рекуперативного седельно-сцепного устройства, массы полуприцепа с лесоматериалами, ускорений при разгоне и торможении лесовозного автопоезда на изменение показателей эффективности работы устройства. Определена оптимальная величина хода поршней гидравлического цилиндра, составившая 200 мм. Она позволяет рекуперировать мощность 6,5 кВт и обеспечивает более благоприятное продольное ускорение полуприцепа – 0,72 м/с<sup>2</sup>. Установлено, что с ростом ускорения при разгоне и торможении лесовозного автопоезда с 1 до 3 м/с<sup>2</sup> возрастает рекуперированная мощность – с 2,2 до 6,8 м/с<sup>2</sup>, а также повышается среднее продольное ускорение полуприцепа – с 0,27 до 0,75 м/с<sup>2</sup>. Изменение загруженности полуприцепа лесоматериалами от 5 до 25 т позволяет увеличить рекуперированную мощность с 1,6 до 7,9 кВт и снизить продольное ускорение полуприцепа с 2,8 до 0,53 м/с<sup>2</sup>. Получены графики

© Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Авдюхин А.В., 2023

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

влияния и картограммы оптимизации, отражающие диаметр и величину хода поршней рекуперативного гидроцилиндра седельно-сцепного устройства в зависимости от рекуперированной мощности и продольного ускорения полуприцепа. Картограммы оптимизации позволили графоаналитическим способом определить среднюю рекуперированную мощность, равную 6,5 кВт при диаметре рекуперативного гидроцилиндра 110 мм и величине хода поршней гидроцилиндра 200 мм.

**Ключевые слова:** оптимизация, эффективность, седельно-сцепное устройство, рекуперированная мощность, седельный лесовозный автопоезд, лесовозная дорога, продольное ускорение полуприцепа, торможение полуприцепа

**Для цитирования:** Посметьев В.И., Никонов В.О., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Авдюхин А.В. Оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 126–139. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-126-139>

Original article

### Optimization of Structural Parameters by Improvement of Pneumohydraulic Fifth-Wheel Coupling Device at Semitrailer Hauling Rig

**Valery I. Posmetyev**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

**Vadim O. Nikonov**<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

**Andrey Yu. Manukovskii**, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

**Viktor V. Posmetyev**, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

**Alexander V. Avdyuhin**, Postgraduate Student; ResearcherID: [HDM-3130-2022](https://orcid.org/0000-0003-2622-8946),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2622-8946>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru), [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru)<sup>✉</sup>, [mayu1964@mail.ru](mailto:mayu1964@mail.ru), [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru), [1988aav@mail.ru](mailto:1988aav@mail.ru)

Received on January 24, 2022 / Approved after reviewing on April 28, 2022 / Accepted on April 30, 2022

**Abstract.** In this study, the benefits of logging transportation under modern conditions by semitrailer hauling rig are examined, which consists of a truck tractor connected to a semitrailer. Furthermore, an analysis is made of the operational implications of using log road trains in insufficiently arranged road conditions. The article describes the potential scientific directions that can optimize the efficiency of semitrailer trucks. An improved construction of a regenerative fifth-wheel coupling device is proposed. It provides better reliability, reduces fuel consumption for log trucks, and gives better working conditions for drivers, along with reduced dynamic loads between the links of the units that occur during the movement in unsteady modes. The research methodology includes the application of the mathematical framework of multifactorial optimization. The specified analytical formulas are derived to determine the performance efficiency of the regenerative fifth-wheel coupling.



It is revealed the connections between the hydraulic cylinder piston stroke values of the regenerative fifth-wheel coupling device, the weight of the loaded semitrailer, the vehicle acceleration during speeding up and braking, and the modifications of the performance indicators of the latching mechanism. The optimal value of the stroke of the pistons of the hydraulic cylinder is determined, which is 200 mm. It provides a power recovery of 6.5 kW and better longitudinal acceleration of the semitrailer at 0.72 m/s<sup>2</sup>. Moreover, it is found that the change in acceleration during the increase in velocity and braking from 1 to 3 m/s<sup>2</sup> gives the change in recuperated power from 2.2 to 6.8 m/s<sup>2</sup>. At the same time, the average longitudinal acceleration of the semitrailer varies from 0.27 to 0.75 m/s<sup>2</sup>. Changing the load of the semitrailer from 5 to 25 tons allows increasing the recuperated power from 1.6 to 7.9 kW and reducing the longitudinal acceleration of the semitrailer from 2.8 to 0.53 m/s<sup>2</sup>. The influence graphs and optimization cartograms present the diameter and hydraulic cylinder piston stroke values of the regenerative fifth-wheel coupling device on the regenerated power and longitudinal acceleration of the semitrailer. According to the optimization cartograms, the average regenerative power is determined using a graph-analytical method. It is equal to 6.5 kW with the diameter of a regenerative hydraulic cylinder of 110 mm and a hydraulic cylinder piston stroke of 200 mm.

**Keywords:** optimization, efficiency, fifth-wheel, regenerated power, logging semitrailer, haulroad, longitudinal acceleration of semitrailer, braking of semitrailer

**For citation:** Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V., Avdyuhin A.V. Optimization of Structural Parameters by Improvement of Pneumohydraulic Fifth-Wheel Coupling Device at Semitrailer Hauling Rig. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 126–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-126-139>

### *Введение*

Наиболее важной совокупностью отраслей российской экономики, осуществляющих заготовку и переработку лесоматериалов, является лесная промышленность. К крупнейшей отрасли лесной промышленности, деятельность которой связана с заготовкой и вывозкой лесоматериалов, относится лесозаготовительная промышленность. В условиях лесозаготовительного производства ведущее место занимает лесовозный транспорт, обеспечивающий бесперебойную работу всех фаз лесозаготовительного процесса. В настоящее время более 80 % общего объема заготавливаемых лесоматериалов вывозится лесовозными автомобилями, от эффективности использования которых зависит конечная стоимость доставляемых потребителям лесоматериалов, а также функционирование лесозаготовительных предприятий.

Наибольшее распространение при вывозке древесины на лесозаготовительных предприятиях приобрели лесовозные автопоезда – седельные тягачи с полуприцепами. Это связано с их преимуществами перед лесовозными автомобилями с прицепами: лучшая маневренность, устойчивость и безопасность при движении, более высокая скорость движения, грузоподъемность и грузоместимость, меньшая металлоемкость, габаритная длина и негативное воздействие на опорную поверхность дороги [4].

Дорожные условия эксплуатации лесовозных тягачей с полуприцепами значительно отличаются от условий эксплуатации аналогичных автопоездов общего назначения. Особенностью таких условий является недостаточная обустроенность лесовозных дорог, при движении по которым в процессе вывозки лесоматериалов лесовозным автопоездам приходится совершать боль-



шое количество троганий с места, торможений и поворотов. Это приводит к возникновению ударных нагрузок между звеньями лесовозного автопоезда, воздействующих на элементы седельно-сцепного устройства и вызывающих неоправданно быстрое изнашивание его деталей, снижение надежности автопоезда, скорости его движения, производительности, а также увеличение расхода топлива.

В связи с этим особое значение приобретают вопросы достижения более эффективного функционирования таких лесовозных автопоездов путем: обоснованного выбора оптимального маршрута вывозки; повышения надежности и ресурса автопоезда; увеличения его эксплуатационной скорости и грузоподъемности; улучшения устойчивости, управляемости и безопасности движения; снижения негативного воздействия на лесовозную дорогу и окружающую среду; сведения к минимуму времени в пути, простоев при погрузочно-разгрузочных работах и при выполнении технического обслуживания и ремонта; повышения уровня квалификации водителей и др. [7–20].

Выполненные авторами исследования выявили негативные последствия влияния традиционных конструкций седельно-сцепных устройств на эксплуатационные свойства лесовозных автопоездов. Это позволило предложить перспективную схему рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства, которое является эффективным средством существенного снижения динамических нагрузок, возникающих между звеньями лесовозного автопоезда в продольном направлении при его неустановившемся движении по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам (рис. 1). Данное сцепное устройство обеспечивает снижение расхода топлива лесовозным автопоездом: при различных переходных режимах движения лесовозного автопоезда за счет преобразования кинетической энергии от силы инерции полуприцепа с лесоматериалами в гидравлическую энергию рабочей жидкости, которая накапливается в пневмогидравлическом аккумуляторе для последующего полезного использования в технологическом процессе погрузки и разгрузки лесоматериалов. Использование такого сцепного устройства, кроме того, позволяет повысить надежность лесовозного автопоезда, в том числе за счет адаптации устройства к дорожным условиям эксплуатации, техническому состоянию автопоезда, а также к квалификации водителя [5].

Для определения геометрических параметров предлагаемого рекуперативного седельно-сцепного устройства, обеспечивающих необходимые показатели эффективности его работы, требуется на основании ранее разработанных математических моделей выполнить теоретическую многофакторную оптимизацию.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования является седельный тягач с полуприцепом, предметом – рекуперативное пневмогидравлическое седельно-сцепное устройство. Для предварительной оценки эффективности предлагаемого сцепного устройства авторами ранее были разработаны математические модели и компьютерные программы [1–3]. Движение лесовозного седельного тягача с полуприцепом в модели описывалось на основании системы дифференциальных уравнений, составленных с использованием законов динамики поступательного и вращательного движения [6].

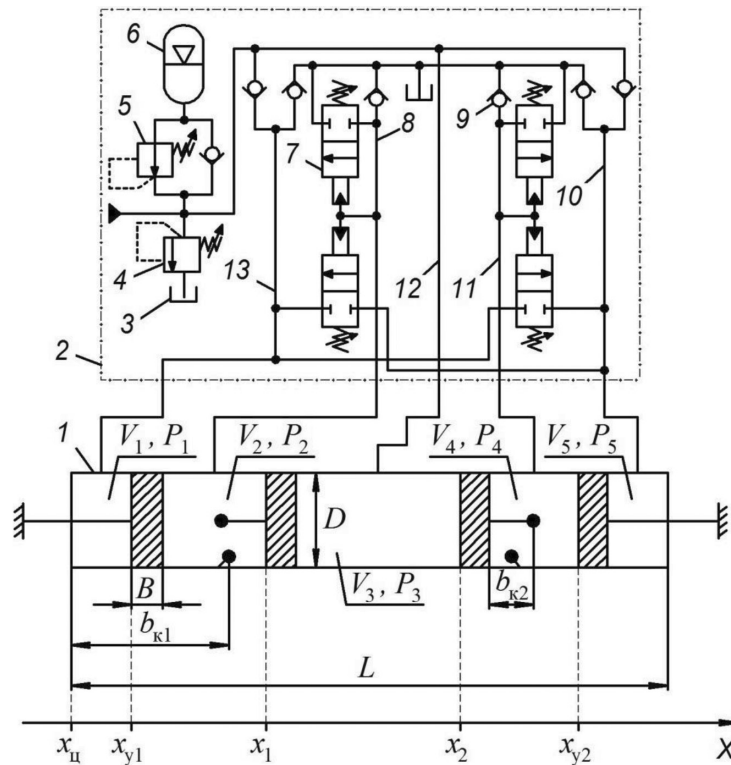


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования гидравлических и механических процессов при функционировании рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства: 1 – гидроцилиндр; 2 – рекуперативный гидропривод; 3 – гидробак; 4, 5 – предохранительный и редуцирующий клапаны; 6 – пневмогидравлический аккумулятор; 7 – нормально закрытый двухпозиционный двухлинейный гидрораспределитель; 8, 10–13 – трубопроводы; 9 – обратный клапан;  $V_1...V_5$  – рабочие полости гидроцилиндра;  $P_1...P_5$  – давление рабочей жидкости в полостях;  $B$  – ширина поршня;  $D$  – диаметр гидравлического цилиндра;  $b_{к1}$  и  $b_{к2}$  – величины хода поршней;  $x_{ц}$ ,  $x_y$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_{y2}$  – координаты расположения поршней гидроцилиндра относительно неподвижной системы координат

Fig. 1. Calculation scheme for modeling hydraulic and mechanical processes during the operation of a recuperative pneumohydraulic fifth-wheel coupling: 1 – hydraulic cylinder; 2 – recuperative hydraulic drive; 3 – hydraulic tank; 4, 5 – safety and pressure reducing valves; 6 – pneumohydraulic accumulator; 7 – normally closed two-position two-line hydraulic valve; 8, 10–13 – pipelines; 9 – unidirectional valve;  $V_1...V_5$  – working cavities of the hydraulic cylinder;  $P_1...P_5$  – pressure values of the working fluid in the cavities;  $B$  – piston width;  $D$  – diameter of the hydraulic cylinder;  $b_{к1}$  and  $b_{к2}$  – piston strokes;  $x_{ц}$ ,  $x_y$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_{y2}$  – coordinates of the location of the hydraulic cylinder pistons relative to the fixed coordinate system

Для описания контакта колес лесовозного автопоезда с опорной поверхностью лесовозной дороги применялась упруго-вязкая упрощенная модель пружинно-демпферной системы, характеризуемая коэффициентами жесткости и

демпфирования рассматриваемой системы. Основными показателями эффективности функционирования предлагаемого сцепного устройства являлись мгновенная и средняя рекуперлируемая мощность и ускорения полуприцепа.

Для определения оптимальных геометрических параметров предлагаемого рекуперативного седельно-сцепного устройства использован математический аппарат многофакторной оптимизации. Варьируя одновременно двумя или более параметрами сцепного устройства, при одних и тех же условиях эксплуатации можно добиться высокой рекуперлируемой мощности  $N_{pc}$  и низких ускорений полуприцепа  $a_{Пс}$ . В качестве оптимизируемых геометрических параметров рекуперативного устройства выбраны:  $D$  – внутренний диаметр устройства (диаметр гидроцилиндра);  $b_k$  – величина хода поршней устройства. В качестве критериев оптимизации взяты показатели:  $N_{pc}$  – средняя рекуперлируемая мощность;  $a_{Пс}$  – среднее абсолютное продольное ускорение полуприцепа.

Расчет средних значений показателей эффективности работы рекуперативного устройства осуществлялся на шагах интегрирования  $\tau_n$  и  $\tau_k$  по следующим зависимостям:

$$N_{pc} = \frac{1}{\tau_k - \tau_n} \sum_{i=\tau_n}^{\tau_k} N_p(\tau);$$

$$a_{Пс} = \frac{1}{\tau_k - \tau_n} \sum_{i=\tau_n}^{\tau_k} |a_{П}(\tau)|.$$

Для определения оптимальных параметров рекуперативного седельно-сцепного устройства проведена серия из 9 компьютерных экспериментов с 9 различными наборами параметров  $D$  и  $b_k$  (см. таблицу). В каждом рассматриваемом случае с точки зрения теории планирования эксперимента был осуществлен полный 2-факторный эксперимент.

**Результаты серии компьютерных экспериментов по оптимизации  
геометрических параметров рекуперативного устройства  
Results from a set of digital tests for optimizing geometric parameters  
of the regenerative device**

Эксперимент	Внутренний диаметр гидроцилиндра	Величина хода поршней	Средняя рекуперлируемая мощность, кВт	Среднее продольное ускорение полуприцепа, м/с <sup>2</sup>
1	100	100	3,7	0,91
2		200	6,4	0,74
3		300	7,9	0,66
4	120	100	4,0	0,90
5		200	6,5	0,72
6		300	7,5	0,60
7	140	100	3,9	0,93
8		200	6,0	0,74
9		300	7,1	0,64

Рассматриваемую задачу 2-факторной оптимизации можно записать аналитически следующим образом:

$$\begin{cases} N_{\text{pc}}(D, b_{\text{к}}) \rightarrow \max; \\ a_{\text{Пс}}(D, b_{\text{к}}) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow D^{\text{опт}}, b_{\text{к}}^{\text{опт}},$$

где  $D^{\text{опт}}$  и  $b_{\text{к}}^{\text{опт}}$  – искомые оптимальные значения соответствующих геометрических параметров рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства.

В процессе решения задачи оптимизации осуществляется поиск определенной области изменения внутреннего диаметра гидроцилиндра и величины хода поршней, одновременно обеспечивающих максимальное значение критерия  $N_{\text{pc}}$  и минимальное – критерия  $a_{\text{Пс}}$ .

Из данных таблицы выведены аналитические зависимости для функций  $N_{\text{pc}}(D, b_{\text{к}})$  и  $a_{\text{Пс}}(D, b_{\text{к}})$ . В целях сглаживания и экстраполяции результатов эксперимента функции были аппроксимированы полиномами 2-го порядка:

$$K(D, b_{\text{к}}) = k_1 D^2 + k_2 b_{\text{к}}^2 + k_3 D b_{\text{к}} + k_4 D + k_5 b_{\text{к}} + k_6,$$

где  $K$  – критерий оптимизации, характеризующий показатели эффективности устройства ( $N_{\text{pc}}$  или  $a_{\text{Пс}}$ );  $k_1 \dots k_6$  – параметры полинома.

Определение параметров полиномов было осуществлено методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{кэ}}} \left( K_{\text{аналит}}(D^i, b_{\text{к}}^i) - K_{\text{кэ}}^i(D^i, b_{\text{к}}^i) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где  $N_{\text{кэ}}$  – количество выполненных оптимизационных компьютерных экспериментов;  $K_{\text{аналит}}$  – полиномиальная зависимость критерия  $K$  от заданных факторов  $D$  и  $b_{\text{к}}$ ;  $i$  – порядковый номер оптимизационного компьютерного эксперимента;  $K_{\text{кэ}}^i$  – значение критерия  $K$ , рассчитанное при выполнении  $i$ -го оптимизационного компьютерного эксперимента с заданными параметрами  $D^i$  и  $b_{\text{к}}^i$ .

В результате аппроксимации методом наименьших квадратов определены аналитические зависимости для показателей эффективности рекуперативного седельно-сцепного устройства  $N_{\text{pc}}$  и  $a_{\text{Пс}}$ :

$$N_{\text{pc}}(D, b_{\text{к}}) = -4,167 \cdot 10^{-4} D^2 - 6,167 \cdot 10^{-5} b_{\text{к}}^2 - 1,250 \cdot 10^{-4} D b_{\text{к}} + 0,117 D + 0,058 b_{\text{к}} - 7,689; \quad (1)$$

$$a_{\text{Пс}}(D, b_{\text{к}}) = 7,5 \cdot 10^{-5} D^2 + 4,00 \cdot 10^{-6} b_{\text{к}}^2 - 5,00 \cdot 10^{-6} D b_{\text{к}} - 0,017 D - 2,40 \cdot 10^{-3} b_{\text{к}} + 2,113. \quad (2)$$

Полученные формулы могут использоваться в конструкторской практике для быстрой оценки (без выполнения моделирования)  $N_{\text{pc}}$  и  $a_{\text{Пс}}$  эффективности рекуперированного устройства по заданным геометрическим параметрам  $D$  и  $b_{\text{к}}$ .

#### Результаты исследования и их обсуждение

Интенсивность разгонов и торможений лесовозного автопоезда может существенно воздействовать на мощность, рекуперированную седельно-сцепным устройством. В целях исследования влияния ускорений при разгоне и торможении  $a_{\text{м}}$  лесовозного автопоезда на показатели эффективности предлагаемого устройства осуществлена серия компьютерных экспериментов, при которых

значения ускорений при разгоне и торможении варьировали от 0 до 6 м/с<sup>2</sup> с шагом 1 м/с<sup>2</sup>. При этом для повышения эффективности сравнительного анализа использовали один и тот же набор событий, генерируемых алгоритмом разгонов и торможений лесовозного автопоезда в модели. Вследствие этого графики ускорения  $a_T(t)$  и скорости  $v_T(t)$  при различных  $a_M$  имеют сходный вид, различаясь преимущественно амплитудой пиков (рис. 2).

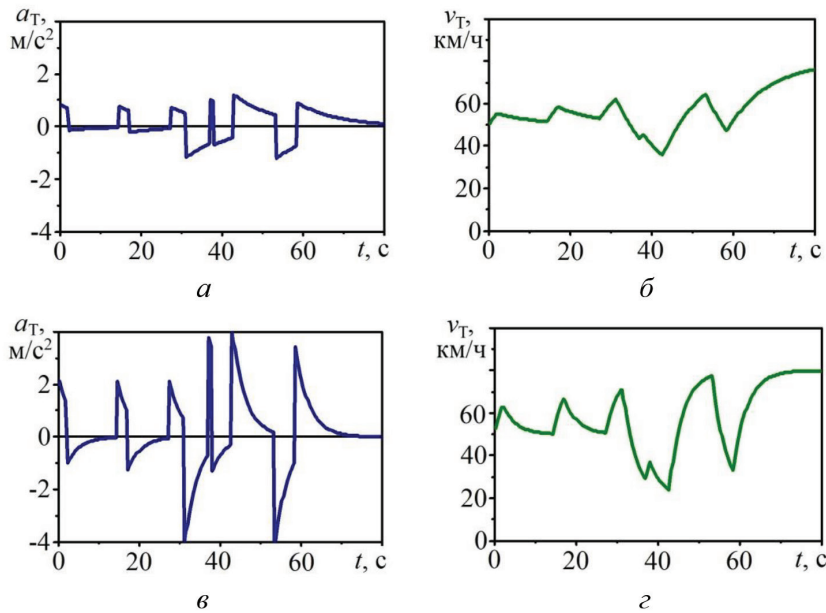


Рис. 2. Зависимости от времени  $t$  ускорения  $a_T$  ( $a$ ,  $в$ ) и скорости  $v_T$  ( $б$ ,  $з$ ) тягача лесовозного автопоезда при различной максимальной величине ускорения  $a_M$  при разгоне и торможении:  $a$ ,  $б$  – 1 м/с<sup>2</sup>;  $в$ ,  $з$  – 4 м/с<sup>2</sup>

Fig. 2. Dependences on time  $t$  of acceleration  $a_T$  ( $a$ ,  $в$ ) and speed  $v_T$  ( $б$ ,  $з$ ) of a logging truck tractor at different maximum values of acceleration  $a_M$  during increase of velocity and deceleration:  $a$ ,  $б$  – 1 m/s<sup>2</sup>;  $в$ ,  $з$  – 4 m/s<sup>2</sup>

Одним из наиболее важных геометрических параметров разработанного рекуперативного седельно-сцепного устройства является величина хода поршней. Учитывая, что в устройстве 2 типа поршней и, соответственно, возможны 2 различных параметра величины хода поршня  $b_{к1}$  и  $b_{к2}$ , в дальнейшем для упрощения будем считать, что величины хода поршня одинаковы:  $b_k = b_{к1} = b_{к2}$ . Для исследования влияния величины хода поршня гидравлического цилиндра на показатели эффективности седельно-сцепного устройства осуществлена серия компьютерных экспериментов, при которых значения  $b_k$  варьировали от 50 до 500 мм с шагом 50 мм. Обнаружено, что величина хода поршня существенно влияет на показатели эффективности, особенно при малых значениях  $b_k$ . С увеличением  $b_k$  от 50 до 200 мм средняя рекуперлируемая мощность возрастает с 2,0 до 6,5 кВт (рис. 3,  $a$ ), а среднее продольное ускорение полуприцепа понижается с 0,97 до 0,72 м/с<sup>2</sup> (рис. 3,  $б$ ). Дальнейшее увеличение хода поршня с 200 до 500 мм существенно повышает габаритные размеры рекуперативного устройства и неопределенность положения полуприцепа по отношению к тягачу при сравнительно небольшом улучшении показателей эффективности: росте средней рекуперлируемой

мощности с 6,5 до 8,4 кВт и уменьшении среднего ускорения полуприцепа с 0,72 до 0,49 м/с<sup>2</sup>. При этом оптимальная величина хода поршней гидравлического цилиндра рекуперативного седельно-сцепного устройства, составившая 200 мм, обеспечивает рекуперированную мощность 6,5 кВт и продольное ускорение полуприцепа 0,72 м/с<sup>2</sup>.

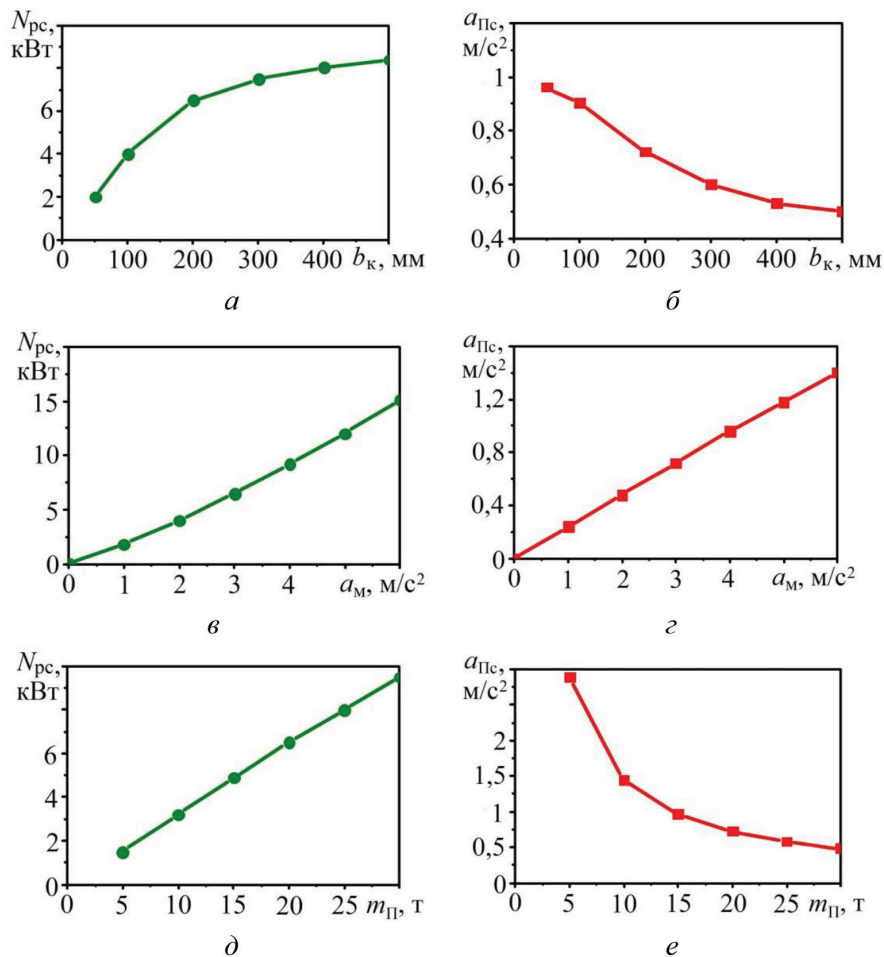


Рис. 3. Зависимость изменения средней рекуперированной мощности и продольного ускорения полуприцепа: от величины хода поршней рекуперативного гидроцилиндра сцепного устройства (а, б); от максимального ускорения при разгоне и торможении  $a_m$  (в, г); от массы полуприцепа  $m_{П}$  (д, е)

Fig. 3. Dependences of the change in the average values of the recuperated power and the longitudinal acceleration of the semitrailer on the stroke of the pistons of the recuperative hydraulic cylinder of the coupling device (а, б), on the maximum acceleration during acceleration and deceleration  $a_m$  (в, г), the mass of the semitrailer  $m_{П}$  (д, е)

Выявлено, что средняя рекуперированная мощность с увеличением  $a_m$  растет по достаточно резкой зависимости, которую приблизительно можно описать степенным законом с показателем, незначительно превосходящим единицу (рис. 3, в). При этом среднее ускорение полуприцепа увеличивается практически линейно с ростом  $a_m$ , это в данном случае, по-видимому,



является тривиальной закономерностью (рис. 3, *з*). Чем с бóльшим ускорением происходят разгоны и торможения, тем бóльшую мощность позволит рекуперировать разработанное седельно-сцепное устройство. Для движения седельных тягачей с полуприцепами на лесовозных дорогах с ускорением при разгоне и торможении от 1 до 3 м/с<sup>2</sup> средняя рекуперлируемая мощность изменяется от 2,2 до 6,8 кВт, среднее продольное ускорение полуприцепа составляет 0,27...0,75 м/с<sup>2</sup>.

Инерционные свойства полуприцепа при движении с ускорением при разгоне и торможении определяют силы, действующие в седельно-сцепном устройстве, поэтому должны оказывать существенное влияние и на показатели эффективности рекуперативного устройства. Для изучения влияния массы полуприцепа  $m_{\Pi}$  на  $N_{pc}$  и  $a_{\Pi c}$  выполнена серия компьютерных экспериментов, в которых массу полуприцепа  $m_{\Pi}$  варьировали от 5 до 30 т с шагом 5 т (рис. 3, *з*, *д*). Обнаружено, что средняя рекуперлируемая мощность практически пропорциональна массе полуприцепа (рис. 3, *з*). Это обусловлено тем, что переносная сила инерции при ускоренном движении пропорциональна массе связанного с тягачом тела. Неблагоприятное среднее продольное ускорение полуприцепа по отношению к тягачу снижается с увеличением массы полуприцепа по приблизительно обратному пропорциональному закону (рис. 3, *д*), что также объяснимо в рамках 2-го закона Ньютона. При эксплуатации лесовозного автопоезда чаще всего возможны 2 режима. В режиме пустого полуприцепа (масса около 5 т) рекуперлируемая мощность достигала 1,6 кВт, а продольное ускорение полуприцепа – 2,8 м/с<sup>2</sup>. При загрузке полуприцепа лесоматериалами до массы 25 т рекуперлируемая мощность составила 7,9 кВт, а продольное ускорение – 0,53 м/с<sup>2</sup>. Разработанное рекуперативное седельно-сцепное устройство сохраняет эффективность при движении как порожнего, так и полностью загруженного полуприцепа, обеспечивая изменение рекуперлируемой мощности в пределах от 1,6 до 7,9 кВт и продольного ускорения полуприцепа – от 0,53 до 2,8 м/с<sup>2</sup>.

Для последующего анализа зависимостей (1) и (2) выполнено построение графиков (рис. 4) и картограмм (рис. 5).

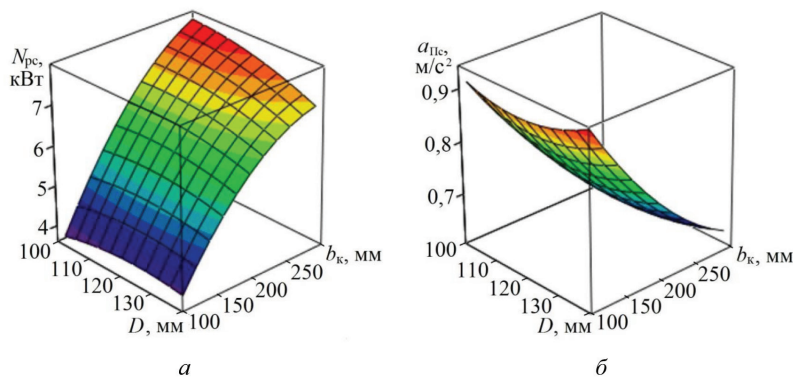


Рис. 4. Влияние диаметра и величины хода поршней рекуперативного седельно-сцепного устройства на показатели его эффективности  $N_{pc}$  (*а*) и  $a_{\Pi c}$  (*б*)

Fig. 4. Graphs of the influence of diameter and piston stroke of a regenerative fifth-wheel coupling device on the efficiency indicators of the device  $N_{pc}$  (*а*) and  $a_{\Pi c}$  (*б*)

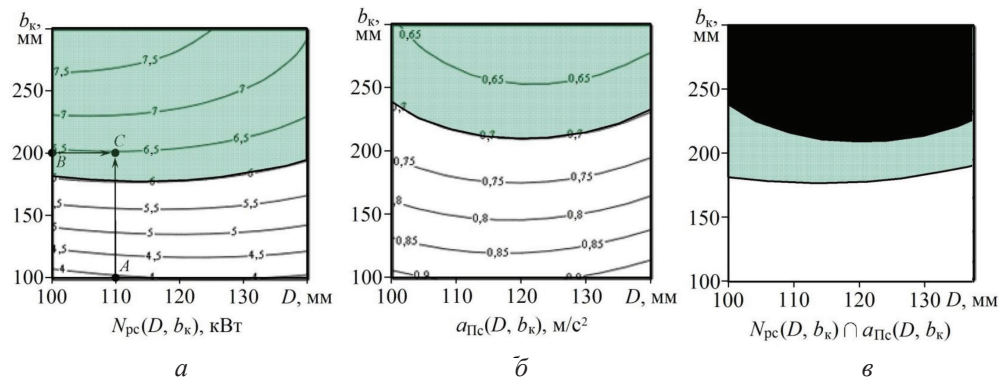


Рис. 5. Картограммы оптимизации диаметра и величины хода поршней рекуперативно-го седельно-цепного устройства: по средней рекуперированной мощности (*a*); по среднему продольному ускорению полуприцепа (*б*); по максимальному  $N_{pc}$  и минимальному  $a_{Пс}$  (*в*)

Fig. 5. Cartograms for optimizing the diameter and the piston stroke of a recuperative fifth-wheel coupling: by the average value of the recuperated power (*a*); according to the average value of the longitudinal acceleration of the semi-trailer (*b*); by the maximum value of  $N_{pc}$  and the minimum value of  $a_{Пс}$  (*c*)

Графики позволяют визуально оценить основные закономерности влияния геометрических параметров предлагаемого седельно-цепного устройства на показатели его эффективности. В частности, из конфигурации поверхностей отклика можно заключить, что величина хода поршня оказывает большее влияние на показатели эффективности, чем диаметр рекуперативно-го седельно-цепного устройства. Картограммы оптимизации дают возможность графоаналитическим способом определить средние рекуперированную мощность и продольное ускорение полуприцепа. Например, при диаметре рекуперативно-го устройства 110 мм (точка А на рис. 5, *a*) и величине хода поршней устройства 200 мм (точка В), проводя перпендикулярные прямые, получаем точку их пересечения С, расположенную вблизи линии уровня  $N_{pc} = 6,5$  кВт. Поэтому искомая средняя рекуперированная мощность составляет около 6,5 кВт. Аналогичным образом можно определить среднее продольное ускорение полуприцепа по картограмме  $a_{Пс}(D, b_k)$  (рис. 5, *б*).

На каждой из 2 картограмм можно выделить благоприятную область факторного пространства, обеспечивающую наилучшие (наибольшее или наименьшее) значения соответствующего критерия. Так, на картограмме  $N_{pc}(D, b_k)$  линия уровня  $N_{pc} = 6$  кВт разделяет рассматриваемое факторное пространство приблизительно пополам: на благоприятную и неблагоприятную области (рис. 5, *a*). Конфигурация благоприятной области позволяет сделать вывод, что рекуперированной мощности более 6 кВт можно добиться при величине хода поршня более 180 мм. Диаметр рекуперативного гидроцилиндра слабо влияет на рекуперированную мощность, однако, судя по положению точки минимума на разграничивающей линии уровня  $N_{pc} = 6$  кВт, оптимальный диаметр составляет около 115 мм. Для картограммы  $a_{Пс}(D, b_k)$  в качестве критического продольного ускорения полуприцепа принято значение  $0,7$  м/с<sup>2</sup>, позволяющее также приблизительно пополам разделить рассматриваемую область факторного пространства (рис. 5, *б*).

Пересечение благоприятных областей 2 картограмм (рис. 5, в) дает возможность найти общую оптимальную область, в которой и критерий рекуперированной мощности, и критерий неблагоприятных ускорений полуприцепа имеют одновременно искомые максимальное и минимальное значения соответственно. В данном случае благоприятная область картограммы  $N_{pc}(D, b_k)$  включает в себя благоприятную область картограммы  $a_{nc}(D, b_k)$ . Из месторасположения на картограмме оптимальной области в факторном пространстве следует, что оптимальный внутренний диаметр рекуперативного седельно-сцепного устройства составляет 120 мм, оптимальная величина хода поршней – 210 мм. В этом случае средняя рекуперированная мощность – 6,55 кВт, среднее продольное ускорение полуприцепа – 0,7 м/с<sup>2</sup>.

### Выводы

Результаты исследования влияния геометрических параметров предлагаемой конструкции седельно-сцепного устройства на показатели эффективности его работы в процессе движения седельного автопоезда, а также определения оптимальных значений этих параметров на основе многофакторной оптимизации позволяют сделать следующие выводы.

1. При изменении значений хода поршня гидроцилиндра предлагаемого сцепного устройства в диапазоне от 50 до 500 мм происходят возрастание рекуперированной мощности с 2 до 8,4 кВт и снижение продольного ускорения полуприцепа с 0,97 до 0,49 м/с<sup>2</sup>. Оптимальное значение хода поршня гидроцилиндра составляет 200 мм. При превышении данного значения существенно увеличиваются габаритные размеры гидравлического цилиндра предлагаемого рекуперативного седельно-сцепного устройства.

2. С повышением ускорения при разгоне и торможении лесовозного автопоезда с 1 до 3 м/с<sup>2</sup> возрастают рекуперированная мощность – с 2,2 до 6,8 м/с<sup>2</sup> и продольное ускорение полуприцепа – с 0,27 до 0,75 м/с<sup>2</sup>. При изменении массы полуприцепа в процессе загрузки лесоматериалами с 5 до 25 т происходят увеличение рекуперированной мощности – с 1,6 до 7,9 кВт и уменьшение продольного ускорения полуприцепа – с 2,8 до 0,53 м/с<sup>2</sup>. Рекуперированной мощности, превышающей 6 кВт, можно достичь при значении хода поршня более 180 мм и диаметре гидроцилиндра 120 мм.

3. Практическое применение предлагаемого рекуперативного седельно-сцепного устройства в конструкции лесовозного тягача с полуприцепом позволит при движении автопоезда в сложных дорожных условиях лесовозных дорог снизить воздействующие на детали седельно-сцепного устройства динамические нагрузки благодаря демпфирующим свойствам его гидравлической системы, сократить расход топлива автопоезда за счет рекуперации гидравлической энергии, а также повысить надежность автопоезда и улучшить условия труда водителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Experiment Planning in Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).

2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.  
Granovskiy V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data in Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).
3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 272 с.  
Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Basic, Fortran and Pascal*. Tomsk, RASKO Publ., 1991. 272 p. (In Russ.).
4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 203 с.  
Nikonov V.O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*: Monograph. Voronezh, VSUFT Publ., 2021. 203 p. (In Russ.).
5. Посметьев В.И., Никонов В.О., Авдюхин А.В. Оценка актуальности использования в конструкции лесовозного тягача с полуприцепом рекуперативного пневмогидравлического седельно-сцепного устройства // Воронеж. науч.-техн. вестн. 2021. Т. 3, № 3(37). С. 76–94.  
Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Avdyuhin A.V. Assessment of the Relevance of Use in the Construction of a Forest Tractor with a Semi-Trailer of a Recuperative Pneumatic Hydraulic Saddle Device. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin*, 2021, vol. 3, no. 3(37), pp. 76–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-76-94>
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Авдюхин А.В. Имитационное моделирование рекуперативного пружинно-гидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 227–242.  
Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Avdyuhin A.V. Simulation Modeling of Recuperative Spring-Hydraulic Fifth-Wheel Coupling of Forest Tractor with Saddle Trailer. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 227–242. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/19>
7. Acuna M., Sosa A. Automated Volumetric Measurements of Truckloads Through Multi-View Photogrammetry and 3D Reconstruction Software. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 151–162.
8. Akay A.E., Serin H., Sessions J., Bilici E., Pak M. Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 42, no. 2, pp. 245–258. <https://doi.org/10.5552/crojte.2021.851>
9. Bako S., Ige B., Nasir A., Nicholas A., Musa N.A. Stability Analysis of a Semi-Trailer Articulated Vehicle: A Review. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2021, vol. 5, iss. 2, pp. 131–140. <https://doi.org/10.30939/ijastech.855733>
10. Brown M.W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight on Payload Efficiency: An Australian Case Study. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, p. 855. <https://doi.org/10.3390/f12070855>
11. Ghaffariyan M.R., Barrier C., Brown M., Kuehmaier M., Acuna M. A Short Review of Timber Truck Fuel Consumption Studies. Australian Forests Operations Research Alliance (AFORA). *Industry Bulletin*, 2018, vol. 21, pp. 1–6.
12. Johannes E., Ekman P., Huge-Brodin M., Karlsson M. Sustainable Timber Transport – Economic Aspects of Aerodynamic Reconfiguration. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/su10061965>
13. Kogler C., Stenitzer A., Rouch P. Simulation Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 12, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/f11121245>

14. Korpinen O.-J., Aalto M., Venalainen P., Ranta T. Impacts of a High-Capacity Truck Transportation System on the Economy and Traffic Intensity of Pulpwood Supply in Southeast Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2019, vol. 40, iss. 1, pp. 89–105.
15. Lachini E., Fiedler N., Silva G., Pinheiro C., Carmo F. Operational Analysis of Forestry Transportation Using Self-Loading Trucks in a Mountainous Region. *Floreste e Ambiente*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.006015>
16. Mitrofanovs I., Cekule M. Effective Collaboration Research Project on IT Solution for Automatic Measurement of Timber Assortment. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2019, vol. 17, pp. 78–83.
17. Monti C.A.U., Gomide L.R., Oliveira R.M., Franca L.C.J. Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 2020, vol. 92, no. 3, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>
18. Palander T., Kärhä K. Improving Energy Efficiency in a Synchronized Road – Transportation System by Using a TFMC (Transportation Fleet – Management Control) in Finland. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/en12040670>
19. Schettino S., Minette L.J., Schettino C.F., Reboleto I.D. Feasibility Analysis of the Use of Light and Medium Trucks in Timber Transport in Rural Properties. *Revista Arvore*, 2018, vol. 42, no. 6, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1590/1806-908820118000600008>
20. Vaatainen K., Anttila P., Elisson L., Enstrom J., Laitila J., Prinz R., Routa J. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2021, vol. 42, no. 1, pp. 39–61. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.803>

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





Научная статья

УДК 621.941

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-140-154

### Силовой анализ процесса резания единичным зерном сферокорунда при шлифовании древесины

*А.В. Сергеевичев<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>*

*В.А. Соколова<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>*

*А.Е. Михайлова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABC-1987-2020](https://orcid.org/0000-0003-0280-7409)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-7409>*

*Е.О. Овчарова<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [ABH-3339-2020](https://orcid.org/0000-0003-1081-7551)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1081-7551>*

*С.А. Войнаш<sup>3</sup>, вед. инж.; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; 910sav@gmail.com, mikhailovaae@ya.ru, evgenya.ov4arova@yandex.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, д. 18, Санкт-Петербург, Россия, 191186; sokolova\_vika@inbox.ru

<sup>3</sup>Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, Россия, 420008; sergey\_voi@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.22 / Одобрена после рецензирования 13.05.22 / Принята к печати 16.05.22

**Аннотация.** Использование абразивных кругов из сферокорунда позволяет повысить производительность процесса шлифования древесины, а также расширить область применения жесткого абразивного инструмента за счет снижения его засаливания и ликвидации прижогов обработанной поверхности. Проведенные исследования выявили следующие преимущества перед шлифовальной шкуркой использования для шлифования древесины абразивных кругов: высокую точность обработки, получение требуемого качества обработанной поверхности, высокую стойкость инструмента и его низкую стоимость. Произведен силовой анализ процесса микрорезания зерном сферокорунда в зависимости от степени его износа. Показано, что снятие стружки зерном сферокорунда возможно только при его определенном состоянии – обнажении режущих стенок. Также получены теоретические зависимости сил при микрорезании от всех основных условий процесса шлифования древесины и древесных материалов: характеристик круга, режимных показателей обрабатываемого материала и связанных с ним факторов. Проанализированы особенности процесса стружкообразования, условия самозатачивания кругов из сферокорунда. Установлено, что наибольшее влияние на толщину стружки, срезаемую одним зерном сферокорунда, оказывает зернистость, влияние других характеристик внутреннего объемного строения инструмента: содержания зерна и связки – менее значительное.

© Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Михайлова А.Е., Овчарова Е.О., Войнаш С.А., 2023



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



В зависимости от обрабатываемого материала необходимо применять абразивный инструмент соответствующих характеристик: зернистости, твердости, структуры; при этом использовать сферокорунд, имеющий оптимальные физико-механические свойства, в частности толщину стенки зерна, которая во многом определяет его разрушающую нагрузку. Глубина шлифования и скорость подачи оказывают решающее влияние на показатели процесса шлифования древесины и древесных материалов абразивными кругами из сферокорунда. Увеличение глубины шлифования и скорости подачи приводит к росту сил резания, шероховатости шлифованной поверхности, к снижению длины шлифования за период стойкости круга и коэффициента шлифования. При фиксированных глубине шлифования и скорости подачи для улучшения показателей процесса шлифования древесины и древесных материалов необходимо увеличивать скорость резания.

**Ключевые слова:** силовой анализ, сферокорунд, абразивные круги из сферокорунда, единичное зерно сферокорунда, шлифование, шлифование древесины, шлифование древесных материалов

**Для цитирования:** Сергеевичев А.В., Соколова В.А., Михайлова А.Е., Овчарова Е.О., Войнаш С.А. Силовой анализ процесса резания единичным зерном сферокорунда при шлифовании древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 140–154. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-140-154>

Original article

## Force Analysis of a Single Grain Cutting Process in Wood Grinding Using Spherical Corundum

*Alexander V. Sergeevichev*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [ABC-2274-2020](https://orcid.org/0000-0003-3655-207X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3655-207X>

*Viktorii A. Sokolova*<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

*Anna E. Mikhailova*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABC-1987-2020](https://orcid.org/0000-0003-0280-7409), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-7409>

*Evgeniya O. Ovcharova*<sup>1</sup>, Graduate Student; Researcher ID: [ABH-3339-2020](https://orcid.org/0000-0003-1081-7551),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1081-7551>

*Sergey A. Voïnash*<sup>3</sup>✉, Engineer; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forestry Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; 910sav@gmail.com, mikhailovaae@ya.ru, evgenya.ov4arova@yandex.ru

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, ul. Bolshaya Morskaya, 18, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation; sokolova\_vika@inbox.ru

<sup>3</sup>Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya, 18, Kazan, 420008, Russian Federation; sergey\_voi@mail.ru✉

Received on February 08, 2022 / Approved after reviewing on May 13, 2022 / Accepted on May 16, 2022

**Abstract.** The productivity of the wood grinding process can be increased by using abrasive wheels with spherical corundum grains. They also expand the area of application of rigid abrasive instruments by reducing soiling and eliminating burns on the treated surface. The studies

revealed several advantages of the abrasive wheels over sanding paper: very precise processing, achievement of the desired grade of the treated surface, high durability of the instrument, and low cost. A force analysis of a grinding surface with micro-cuttings made of spherical corundum grains was performed depending on the degree of its wear. The results revealed that chip removal by the spherical corundum grains was possible only under certain conditions when the cutting edges of the grains were exposed. Besides, the theoretical dependencies of forces in micro-cutting were obtained from every principal condition for the process of grinding wood and wooden materials: properties of the spheres, treatment modes, and material-related factors. The special properties were analyzed by the chip formation process and self-sharpening conditions of the spherical corundum wheels. The grain size had the greatest influence on the thickness of chips which were cut by one grain. The grain content and bonding, like other properties of the internal volumetric structure, had a less substantial impact. The abrasive tool characteristics must complement the processed material, such as grain size, hardness, and structure. On the other hand, spherical corundum has optimal physical and mechanical properties for grinding, particularly the thickness of the grain's edges, which primarily determine the material's tensile strength. The grinding depth and feed rate mostly define the parameters of the grinding performance of wood and wood-based materials. An increase in those leads to a rise in cutting forces, roughness of the ground surface, a reduction in the grinding length over the period of the wheel's durability, and the grinding coefficient. If the grinding depth and feed rate are constant, the performance can be improved by increasing the cutting rate.

**Keywords:** force analysis, spherical corundum, abrasive wheels of spherical corundum, spherical corundum grain, grinding, wood grinding, grinding of wooden materials

**For citation:** Sergeevichev A.V., Sokolova V.A., Mikhailova A.E., Ovcharova E.O., Voinash S.A. Force Analysis of a Single Grain Cutting Process in Wood Grinding Using Spherical Corundum. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 140–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-140-154>

### *Введение*

Как отечественные, так и зарубежные исследователи отмечают, что использование для шлифования древесины абразивных кругов имеет следующие преимущества перед шлифовальной шкуркой: высокую точность обработки, получение требуемого качества обработанной поверхности, высокую стойкость инструмента, его низкую стоимость [4, 11]. Применение абразивных кругов из сферокорунда при шлифовании древесины и древесных материалов позволяет увеличить производительность процесса шлифования, а также расширить область применения жесткого абразивного инструмента за счет снижения его засаливания и ликвидации прижогов обработанной поверхности.

В большинстве случаев при конструировании кинематической модели абразивного инструмента используется допущение: абразивные зерна представляются в виде точек. Вследствие этого форма и размеры зерен в кинематической модели не учитываются. Это объясняется тем, что объектом исследования в кинематике являются не абразивные зерна, а критерии, по которым определяется их работа: толщина, длина стружки, количество одновременно работающих зерен, длина дуги контакта шлифующего зерна с деталью и т. д. [4, 8, 12, 16, 19, 20].

Цель исследования – изучить процесс стружкообразования зерном сферокорунда, а именно установить зависимость процесса от влияющих факторов и определить действие сил на стенках зерна сферокорунда.

## Объекты и методы исследования

В кинематической модели абразивного круга из сферокорунда, исходя из изложенных выше положений, зерно следует моделировать окружностью. Точками будут режущие элементы зерна – стенки сферы, расположенные по окружности, – т. е. не учитывается толщина стенки зерна сферокорунда. Окружность зерна при работе и правке претерпевает изменения, расстояние между режущими элементами варьируется и представляет собой длину хорды данной окружности. Это определяет необходимость рассматривать все кинематические критерии применительно к  $H_{12}$  (разница в высоте 1-го и 2-го зерен, м). Уравнение траектории движения абразивного зерна при плоском шлифовании периферией круга представляет собой циклоидальную кривую. Для задней стенки 1-го абразивного зерна, лежащего на расстоянии  $R$ , м, от мгновенного центра скоростей, уравнение имеет вид

$$\begin{cases} x_1 = \frac{V_s}{\omega} \varphi_1 + R \sin \varphi_1; \\ y_1 = \frac{V_s}{\omega} + R \cos \varphi_1, \end{cases}$$

где  $V_s$  – скорость подачи, м/с;  $\omega$  – угловая скорость круга,  $c^{-1}$ ;  $\varphi_1$  – переменный угол контакта задней стенки 1-го абразивного зерна, ...°.

Переменный угол контакта режущего элемента абразивного зерна изменяется в диапазоне  $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_{\max}$ , где  $\varphi_{\max} = \sqrt{2h/R}$  ( $h$  – глубина шлифования, м).

Угловое расстояние между абразивными зёрнами  $\theta_{12} = \frac{\delta}{R}$ , и уравнение для траектории для передней стенки 2-го зерна будет иметь вид

$$\begin{cases} x_2 = \frac{V_s}{\omega} \left( \varphi_2 - \frac{\delta}{R} \right) + (R \pm H_{12}) \sin \varphi_2; \\ y_2 = \frac{V_s}{\omega} + (R \pm H_{12}) \cos \varphi_2, \end{cases}$$

где  $\delta$  – расстояние между соседними зёрнами, м.

Угловое расстояние между задними стенками зерен  $\theta_{12} = \frac{\delta + l}{R}$ , и аналогичное уравнение для задней стенки 2-го зерна:

$$\begin{cases} x_3 = \frac{V_s}{\omega} \left( \varphi_3 - \frac{\delta + l}{R} \right) + (R \pm H_{12}) \sin \varphi_3; \\ y_3 = \frac{V_s}{\omega} + (R \pm H_{12}) \cos \varphi_3, \end{cases}$$

где  $l$  – расстояние между стенками зерен, м.

Каждая из траекторий при сложении двух движений: вращательного с угловой скоростью  $\omega$  и поступательного со скоростью  $V_s$  – за один оборот в теле древесины может пересекаться с соседней траекторией не более одного раза. Область между двумя траекториями представляет собой кинематически возможную толщину стружки. Толщина срезаемого слоя одним режущим элементом оказывает очень сильное влияние на весь процесс шлифования: с изменением толщины стружки происходит изменение режима работы круга и условий шлифования. От толщины срезаемого слоя обрабатываемого материала

ла зависят силы резания на шлифуемом элементе круга, износ зерен, связки, а следовательно, и стойкость круга, шероховатость обработанной поверхности, мгновенная температура в зоне резания и др.

Уравнение максимальной толщины стружки, снимаемой одним зерном, для передней стенки зерна сферокорунда имеет вид

$$a_1 = 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}} \delta, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость резания, м/с;  $D$  – диаметр круга, м.

Максимальная толщина стружки, срезаемая 2-й стенкой зерна сферокорунда,

$$a_2 = 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}} l. \quad (2)$$

Максимальная толщина слоя обрабатываемого материала, снимаемая одним зерном сферокорунда,  $a = a_1 + a_2$ .

У сплошных абразивных материалов срезания по траектории задней стенки зерна не происходит, толщины срезаемой стружки  $a_2$  не существует, значение  $l$  для них характеризовало бы площадку износа зерна. Сферическая форма зерна снижает площадь соприкосновения зерна с обрабатываемым материалом, что ведет к уменьшению сил трения и температуры в зоне резания.

Число шлифующих зерен, действующих в пределах дуги контакта, будет находиться из зависимости

$$i = \frac{1}{\delta + l} \left( 1 + \frac{V_s}{V} \right) \sqrt{Dh}. \quad (3)$$

Толщина стружки, срезаемая одним зерном, и число одновременно работающих зерен определяют любой показатель операции шлифования. Они связаны между собой обратной связью, рост одной из величин приводит к уменьшению другой. Схема для расчета поверхностных геометрических параметров представлена на рис. 1.

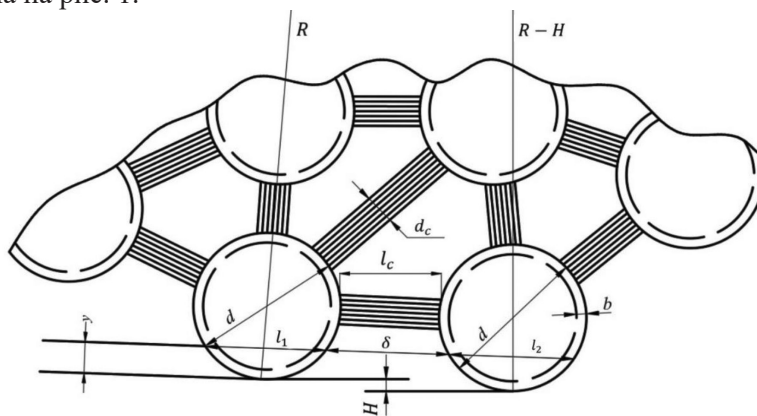


Рис. 1. Схема для определения поверхностных геометрических параметров абразивного круга из сферокорунда ( $d$  – диаметр зерна, м;  $d_c$ ,  $l_c$  – диаметр и длина стружки, м;  $b$  – толщина стенки абразивного зерна, м;  $H$  – толщина стружки, м)

Fig. 1. Scheme for determining the surface geometric parameters of abrasive wheel made of spherical corundum ( $d$  – grain diameter, m;  $d_c$ ,  $l_c$  – diameter and length of chip, m;  $b$  – edge thickness of abrasive grain, m;  $H$  – chip thickness, m)

Дискретный параметр описания поверхности абразивного инструмента – число шлифующих зерен, действующих в пределах дуги контакта, – для кругов из сферокорунда имеет меньшее численное значение, чем для абразивных инструментов из обычных абразивных материалов, так как значение  $l$  в формуле (3) учитывает и размер зерна. Толщина стружки, срезаемая одним зерном, для кругов из сферокорунда больше, чем для кругов из сплошного абразивного материала, на величину  $a_2$ . С увеличением  $a$  должно происходить и увеличение шероховатости обработанной поверхности. Однако для сферокорунда одновременно с ростом толщины стружки растет количество режущих элементов по сравнению с обычными абразивными материалами. Увеличение количества шлифующих зерен в пределах дуги контакта круга с древесиной, обеспечивающих заданную глубину резания, оказывает положительное влияние на шероховатость обработанной поверхности. Дополнительный срез обрабатываемого материала, осуществляемый задней стенкой зерна сферокорунда, с кинематической точки зрения должен снижать шероховатость шлифованной поверхности.

Уравнения (1) и (2) определяют только кинематически возможную толщину стружки. Совместное решение этих уравнений относительно  $a$  позволит получить толщину стружки, которую при заданных кинематико-геометрических условиях шлифования обеспечит выбранная характеристика инструмента.

Толщину стружки будем определять применительно ко всему зерну. Из формул (1), (2) выразим значение  $(\delta + l)$ , тогда взаимосвязь кинематической и инструментальной моделей примет вид системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} (\delta + l)_y = 1,18\sqrt{dy} + \frac{(1 - \beta_b - \beta_g)0,5d^{2,5}}{\beta_g(19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)y^{1,5}} + 2\sqrt{(y-b)(d-b-y)}; \\ (\delta + l)_K = 0,5\frac{V_s}{V}\sqrt{\frac{D}{h}}(a \pm H); \\ y = y' + (a \pm H), \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $y$  – срезы;  $\beta_b, \beta_g$  – относительное содержание связки и зерна соответственно;  $K$  – кинематический критерий;  $y'$  – срез стружки.

Для решения данной системы уравнений используем графический метод, так как способа получить точный результат аналитическим методом нет. Примем следующее допущение: разновысотность между зернами отсутствует, т. е.  $H = 0$ . Применение данного допущения объясняется тем, что разновысотность представляет собой случайную величину, ее трудно прогнозировать, она определяется только экспериментальным путем. Наиболее часто встречающиеся на практике значения  $H = 10^{-2} \dots 10^{-5}$  мм. Определение толщины срезаемой стружки и динамического расстояния между режущими элементами зерен абразивных кругов из сферокорунда произведем для частного случая, когда зерна на поверхности круга срезаны наполовину, т. е.  $y' = \frac{d}{2}$ .

Графический метод решения системы уравнений (4) приведен на рис. 2. Суммарное расстояние между режущими элементами абразивных зерен ( $\delta + l$ ) на рассматриваемом интервале изменения значения  $u$  практически неизменно. Следовательно, динамическое расстояние между режущими элементами абразивного круга, согласно предлагаемой модели, незначительно зависит от режимов шлифования, а толщина стружки, срезаемая заданным рельефом круга, почти полностью определяется кинематическими соотношениями. Они выражаются кинематическим критерием  $K = 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}}$ .

Для графического решения использовали 3 значения  $K$ -критерия:

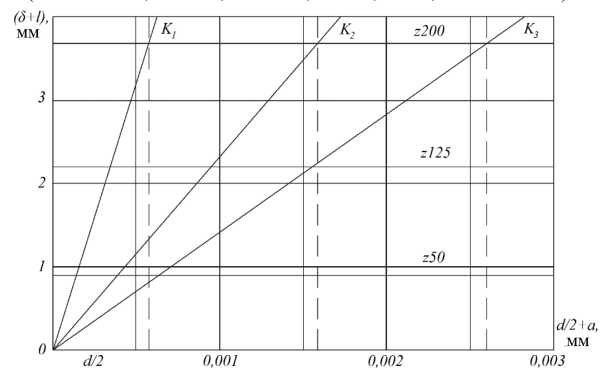
$$K_1 = 1,623 \cdot 10^{-4} (V = 15 \text{ м/с}, V_s = 0,032 \text{ м/с}, h = 0,2 \text{ мм}, D = 150 \text{ мм});$$

$$K_2 = 4,820 \cdot 10^{-4} (V = 25 \text{ м/с}, V_s = 0,116 \text{ м/с}, h = 0,4 \text{ мм}, D = 150 \text{ мм});$$

$$K_3 = 7,228 \cdot 10^{-4} (V = 35 \text{ м/с}, V_s = 0,200 \text{ м/с}, h = 0,6 \text{ мм}, D = 150 \text{ мм}).$$

Рис. 2. Определение графическим методом максимальной толщины стружки, срезаемой одним зерном ( $z$  – шероховатость)

Fig. 2. Determination by graphical method of the maximum thickness of chips being cut by one grain ( $z$  – roughness)



В зависимости от  $K$ -критерия в выбранном интервале толщина стружки меняется от 0,60 до 2,70 мкм для кругов  $z200$ ; для  $z125$   $a = 0,35 \dots 1,60$  мкм, для  $z50$   $a = 0,15 \dots 0,65$  мкм. Как видно из этих значений, влияние зернистости абразивных кругов из сферокорунда на толщину стружки, срезаемую одним шлифующим зерном, очень велико. Влияние других инструментальных факторов, параметров внутреннего объемного строения инструмента: относительного содержания зерна и связки – менее значительное.

Возникающие в процессе шлифования силы резания являются результирующими от сложения сил, действующих на каждое единичное шлифующее зерно [1, 10, 17]. Образование стружки происходит вследствие микрорезания шлифуемого материала одним отдельно взятым абразивным зерном. Поэтому для выяснения влияния различных параметров и условий на динамику процесса шлифования древесины и древесных материалов абразивными кругами из сферокорунда необходимо изучение механизма микрорезания – царапания единичным зерном сферокорунда [3, 7, 13, 14].

Сферическая форма приводит к наличию отрицательного переднего угла и большого фактического угла резания. Каждое режущее абразивное зерно по мере движения по траектории обуславливает 3 стадии: упругой, пластической деформации обрабатываемого материала и стружкообразования [15, 20]. Начало каждой из стадий определяется глубиной внедрения зерна в обрабатываемый материал, формой и размером зерна. Общей характеристикой этих особенностей для каждого зерна служит передний угол зерна,  $\dots^\circ$ . Для зерен сферокорунда он определяется по формуле



$$\gamma = \arcsin\left(1 - 2\frac{a}{d}\right).$$

При срезании стружки между абразивным зерном и обрабатываемым материалом возникает силовое взаимодействие. Для силового анализа процесса микрорезания зерном сферокорунда используем методику Е.Н. Маслова, изложенную в работе [5]. Схема сил, действующих при микрорезании, показана на рис. 3.

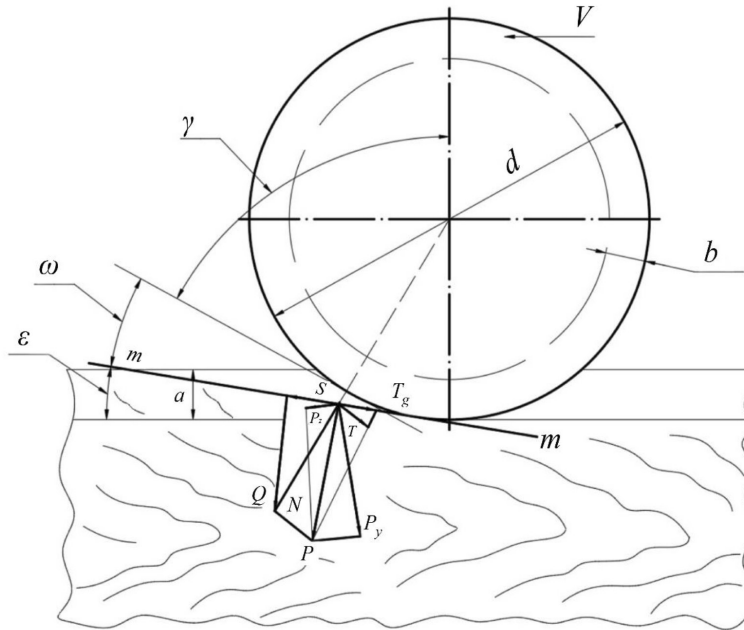


Рис. 3. Схема действия сил при резании единичным зерном сферокорунда ( $\epsilon$  – угол плоскости стружкообразования, ...°)

Fig. 3. Scheme of forces action while cutting with a single grain of spherical corundum ( $\epsilon$  – angle of the chip formation plane, ...°)

Принимаем, что коэффициент трения древесины о переднюю поверхность зерна является постоянным, так как площадь контакта небольшая. Нормальная ( $P_y$ ) и касательная ( $P_z$ ) составляющие силы резания определяются из выражений:

$$P_y = N \sin \gamma + T \cos \gamma;$$

$$P_z = N \cos \gamma - T \sin \gamma,$$

где  $N$  – равнодействующая нормального давления на переднюю поверхность зерна, Н;  $T$  – равнодействующая сил трения, Н.

Так как  $T = f_{fs} N$ ,

$$P_y = N (\sin \gamma + f_{fs} \cos \gamma); \quad (5)$$

$$P_z = N (\cos \gamma - f_{fs} \sin \gamma), \quad (6)$$

где  $f_{fs}$  – коэффициент трения древесины о переднюю поверхность зерна.

Развитие сил определяется процессами пластической деформации и на конечной стадии – разрешающим сдвигом по плоскости стружкообразования, если фактическое касательное напряжение  $\tau$  в данной плоскости достигло величины предела упругости древесины при скалывании. Равнодействующую силу нормального давления  $N$  в формулах (5), (6) определяем из условия прочности древесины на скалывание. Для этого силы  $N$ ,  $T$  раскладываем в направлении плоскости стружкообразования и в плоскости, нормальной к ней:

$$S = N\sin\omega - T\cos\omega; \quad (7)$$

$$Q = N\cos\omega + T\sin\omega, \quad (8)$$

где  $S$  – срезающая сила, действующая вдоль плоскости стружкообразования,  $H$ ;  $Q$  – сила, сжимающая древесину в плоскости нормальной к плоскости стружкообразования,  $H$ .

Из рис. 3 видно, что  $\omega = 90 - (\gamma + \varepsilon)$ . Подставляя данное значение, получим

$$S = N(\cos(\gamma + \varepsilon) - f_{fs}\sin(\gamma + \varepsilon)); \quad (9)$$

$$Q = N(\sin(\gamma + \varepsilon) + f_{fs}\cos(\gamma + \varepsilon)). \quad (10)$$

Угол наклона плоскости наибольших касательных напряжений, по которой происходит разрушающий сдвиг, – угол плоскости стружкообразования. Он может быть определен по формуле [2, 8]:

$$\operatorname{ctg}\varepsilon = \sqrt{2/m - 1} \left(1 + \sqrt{1 + 2f_{fs}}\right), \quad (11)$$

где  $m = \frac{a}{0,5d}$ .

Во время сдвига элемента стружки относительно срезаемого слоя в плоскости стружкообразования возникает добавочное сопротивление, вследствие сил внутреннего трения пропорциональное нормальному давлению,

$$T_g = f_\tau Q, \quad (12)$$

где  $f_\tau$  – коэффициент внутреннего трения, примерно численно равный коэффициенту внешнего трения древесины по древесине.

Равнодействующая касательных напряжений  $\tau$  в плоскости стружкообразования при их принятом размерном распределении находится по формуле [6, 9, 18]

$$T_\tau = \frac{\tau a}{\sin\varepsilon}. \quad (13)$$

Таким образом, в плоскости стружкообразования действуют: внешняя сила  $S$ , срезающая, преодолевающая сопротивление древесины сдвигу; внутренняя сила трения  $T_g$  и равнодействующая сила касательных напряжений  $T_\tau$ .

Срезание слоя древесины произойдет при условии

$$S - T_g = T_\tau.$$

Подставляя в эту формулу выражения из формул (9)–(13), получаем

$$N(\cos(\gamma + \varepsilon) - f_{fs}\sin(\gamma + \varepsilon)) - f_\tau N(\sin(\gamma + \varepsilon) + f_{fs}\cos(\gamma + \varepsilon)) = \frac{\tau a}{\sin\varepsilon}.$$

Выполнив преобразования, имеем

$$N[\cos(\gamma + \varepsilon)(1 - f_{fs}f_\tau) - \sin(\gamma + \varepsilon)(f_{fs}f_\tau)] = \frac{\tau a}{\sin\varepsilon}.$$

Откуда

$$N = \frac{\tau a}{\sin \varepsilon (\cos(\gamma + \varepsilon)(1 - f_{fs} f_{\tau}) - \sin(\gamma + \varepsilon)(f_{fs} f_{\tau}))}.$$

Подставляем полученное значение  $N$  в формулы (5), (6) и получаем выражение для определения составляющих силы резания единичным абразивным зерном сферокорунда:

$$P_y = \frac{\tau a (\sin \gamma + f_{fs} \cos \gamma)}{\sin \varepsilon (\cos(\gamma + \varepsilon)(1 - f_{fs} f_{\tau}) - \sin(\gamma + \varepsilon)(f_{fs} f_{\tau}))}; \quad (14)$$

$$P_z = \frac{\tau a (\cos \gamma - f_{fs} \sin \gamma)}{\sin \varepsilon (\cos(\gamma + \varepsilon)(1 - f_{fs} f_{\tau}) - \sin(\gamma + \varepsilon)(f_{fs} f_{\tau}))}. \quad (15)$$

Данные силовые зависимости установлены применительно к целому абразивному зерну. Однако зерно сферокорунда имеет свойство в процессе работы или правки разрушаться с обнажением острых режущих стенок. В связи с этим необходимо рассмотреть особенности системы сил при микрорезании обеими стенками зерна по мере уменьшения его режущей части.

В полученных формулах эти особенности зерна сферокорунда будут отражаться на изменении переднего угла. Он варьирует в широких пределах: по мере износа зерна может принимать значения от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . На практике с учетом толщины формируемого и срезаемого слоя обрабатываемого материала граничные значения могут не учитываться. Изменение переднего угла приведет к изменению абсолютных касательной и нормальной составляющих силы резания, их направления и соотношения.

Формулы (14), (15) получены для условий микрорезания передней по направлению вращения стенкой зерна. Изменение режущей части зерна является функцией координаты глубины профиля  $y$ , начало которой совпадает с вершиной зерна. Поэтому в общем случае формулы для расчета значений переднего угла с учетом знака и угла стружкообразования для передней стенки примут следующий вид:

$$\gamma_1 = -\arcsin\left(1 - 2\frac{y}{d}\right);$$

$$\varepsilon_1 = \operatorname{arccctg}\left(\sqrt{\frac{d}{y}} - 1\left(1 + \sqrt{1 + 2f_{fs}}\right)\right).$$

Для задней стенки данные углы определяются выражениями:

$$\gamma_2 = -\arcsin\left(\frac{d/2 - y}{d/2 - b}\right);$$

$$\varepsilon_2 = \operatorname{arccctg}\left(\sqrt{\frac{d - 2b}{d - b - y}} - 1\left(1 + \sqrt{1 + 2f_{fs}}\right)\right).$$

Подставляя полученные ранее зависимости (1), (2) для толщины снимаемого слоя режущими элементами зерна сферокорунда в (14), (15) и учитывая знак фактического переднего угла, получим формулы для определения составляющих силы резания на каждой стенке зерна:

$$P_{z_1} = \frac{\tau \cdot 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}} \left( 1,18\sqrt{dy} + \frac{1 - \beta_g - \beta_b}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} K_g \frac{d^{2,5}}{y^{1,5}} \right) (\cos\gamma_1 + f_{fs} \sin\gamma_1)}{\sin\varepsilon_1 (\cos(\varepsilon_1 - \gamma_1)(1 - f_{fs}f_\tau) - \sin(\varepsilon_1 - \gamma_1)(f_{fs} + f_\tau))};$$

$$P_{y_1} = \frac{\tau \cdot 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}} \left( 1,18\sqrt{dy} + \frac{1 - \beta_g - \beta_b}{\beta_g (19,5(\beta_g + \beta_b) - 2,5)} K_g \frac{d^{2,5}}{y^{1,5}} \right) (f_{fs} \cos\gamma_1 - \sin\gamma_1)}{\sin\varepsilon_1 (\cos(\varepsilon_1 - \gamma_1)(1 - f_{fs}f_\tau) - \sin(\varepsilon_1 - \gamma_1)(f_{fs} + f_\tau))};$$

$$P_{z_2} = \frac{\tau \cdot 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}} \cdot 2\sqrt{(y-b)(d-b-y)} (\cos\gamma_2 + f_{fs} \sin\gamma_2)}{\sin\varepsilon_2 (\cos(\varepsilon_2 - \gamma_2)(1 - f_{fs}f_\tau) - \sin(\varepsilon_2 - \gamma_2)(f_{fs} + f_\tau))};$$

$$P_{y_2} = \frac{\tau \cdot 2 \frac{V_s}{V} \sqrt{\frac{h}{D}} \cdot 2\sqrt{(y-b)(d-b-y)} (f_{fs} \cos\gamma_2 - \sin\gamma_2)}{\sin\varepsilon_2 (\cos(\varepsilon_2 - \gamma_2)(1 - f_{fs}f_\tau) - \sin(\varepsilon_2 - \gamma_2)(f_{fs} + f_\tau))};$$

где  $P_{z_1}$ ,  $P_{y_1}$  – соответственно касательная и нормальная составляющие силы резания на передней стенке, Н;  $P_{z_2}$ ,  $P_{y_2}$  – соответственно касательная и нормальная составляющие силы резания на задней стенке, Н;  $K_g$  – коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу.

Полученные формулы отражают взаимосвязь сил при микрорезании от всех основных факторов, влияющих на процесс шлифования: физико-механических свойств обрабатываемого материала –  $\tau$ ,  $f_\tau$ , режимных параметров –  $V_s$ ,  $V$ ,  $h$ , инструментальных факторов –  $d$ ,  $\beta_g$ ,  $\beta_b$ ,  $D$  и других условий шлифования.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для определения показателей процесса шлифования: переднего угла зерна, угла плоскости стружкообразования, толщины срезаемой каждым режущим элементом зерна стружки, расстояния между режущими элементами, сил на каждом режущем элементе инструмента, суммарной силы резания на зерне сферокорунда и других значений в зависимости от износа зерна, режимных показателей процесса шлифования, показателей внутреннего объемного строения круга, физико-механических свойств обрабатываемого материала – применяются математико-статистические модели на основе теоремы Байеса.

Графические зависимости полученных теоретических результатов приведены на рис. 4–5.

При увеличении характеризуемого координатой  $y$  износа зерна сферокорунда происходит значительное изменение сил при микрорезании как по абсолютной величине, так и по направлению действия. Составляющие силы резания имеют резко выраженную границу изменения направления своего действия, описываемую определенным значением  $y_{cr1}$ . До достижения значения  $y_{cr1}$ , которое может быть результатом совместного сложения как износа зерна по диаметру, так и толщины срезаемого слоя обрабатываемого материала, про-

процесса стружкообразования не происходит. Касательная составляющая силы резания на этом участке имеет отрицательное значение, т. е. направлена в противоположную сторону движения зерна. Значит, преобладающими являются силы внешнего трения, и при данных значениях  $y < y_{cr1}$  могут происходить только упругая и пластическая деформации обрабатываемого материала.

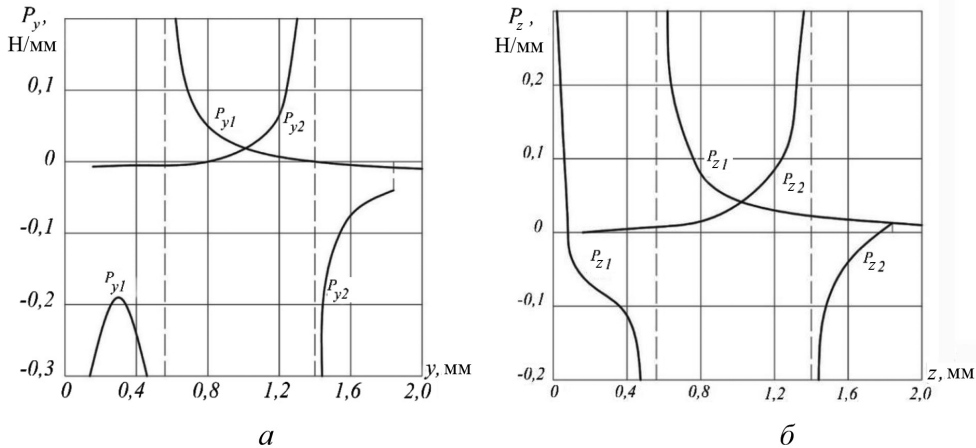


Рис. 4. Зависимость нормальной (а) и касательной (б) составляющих силы резания на передней и задней стенках зерна от его износа  $y$  ( $f_{fs} = 0,4$  и  $f_{\tau} = 0,5$ )

Fig. 4. Dependence of the normal (a) and tangential (б) components of the cutting force on the front and rear edges of the grain on its wear  $y$  ( $f_{fs} = 0.4$  and  $f_{\tau} = 0.5$ )

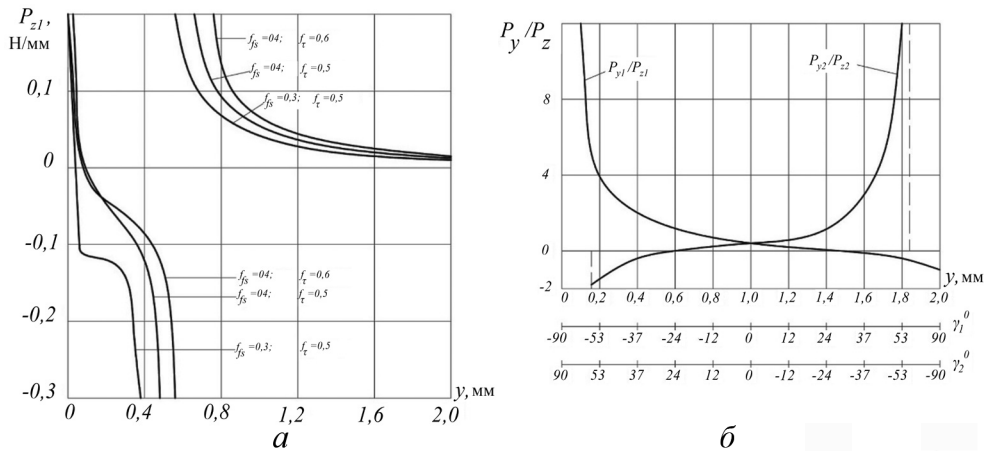


Рис. 5. Зависимость: а – касательной составляющей силы резания от износа зерна при различных коэффициентах  $f_{fs}, f_{\tau}$ ; б – отношения сил  $P_y / P_z$  на режущих элементах зерна от его износа (переднего угла  $\gamma$ ),  $f_{fs} = 0,4$

Fig. 5. Dependence: a – of the tangential component of cutting force on grain wear with different coefficients  $f_{fs}, f_{\tau}$ ; б – the force ratio  $P_y / P_z$  on the cutting elements of the grain on its wear (rake angle  $\gamma$ ),  $f_{fs} = 0.4$

Резкое изменение направления действия сил свидетельствует, по-видимому, о начале стружкообразования, критерием перехода от режима деформации к стружкообразованию служит отношение  $y/d$ . Значению  $y_{cr1}$  соответствует передний угол, примерно равный  $\gamma = -25^\circ$ , а само критическое

значение, например, для абразивного зерна размером  $d = 2$  мм при  $f_{fs} = 0,4$  и  $f_{\tau} = 0,5$  составляет примерно 0,55 мм. Следовательно, при суммарном значении износа зерна (как в процессе правки круга, так и при шлифовании) и толщины стружки до  $1/4$  диаметра зерна силового взаимодействия зерна с обрабатываемым материалом с образованием стружки происходить не будет. При увеличении  $u$  уменьшается фактический передний (отрицательный) угол, уменьшаются и составляющие силы резания. Нормальная составляющая на участке стружкообразования переходит из силы отжима в силу затягивания при малом положительном переднем угле.

Характер действия сил на задней стенке зерна аналогичен действию сил на передней стенке, но последовательность действия обратная. Срезание слоя обрабатываемого материала задней стенкой зерна начнется с момента износа зерна на величину  $y > b$ , причем раньше, чем передней стенкой. Но вследствие незначительного расстояния между стенками толщина стружки минимальная, силы незначительные. Нормальная составляющая силы резания направлена в стружку, имеет отрицательное значение и является силой затягивания. При увеличении износа зерна плавно растут составляющие силы резания, нормальная составляющая меняет знак – становится силой отжима. Увеличение сил происходит до максимума при  $y_{cr_2}$  с последующим резким изменением направления действия. Процесс стружкообразования задней поверхностью зерна с этого момента прекращается, и дальше возможно только деформирование материала.

Влияние на систему сил при микрорезании зерном сферинокорунда коэффициентов внешнего и внутреннего трения  $f_{fs}$ ,  $f_{\tau}$  является значительным. При увеличении  $f_{fs}$  и  $f_{\tau}$  происходит смещение значения  $y_{cr}$  при котором начинается стружкообразование (рис. 5, а).

Соотношение сил  $P_y / P_z$  в зависимости от значения  $y$  и переднего угла при различных коэффициентах  $f_{fs}$  при микрорезании показано на рис. 5, б. Из рисунка видно, что на участках стружкообразования на режущих элементах зерна отношение  $P_y / P_z < 1$ , при  $y = y_{cr}$  :  $P_y / P_z = 1$ . На участках стружкообразования передний угол имеет небольшое отрицательное или положительное значение, поэтому нормальная составляющая меньше касательной.

### Выводы

1. Процесс стружкообразования зерном сферинокорунда возможен только при его определенном состоянии – обнажении режущих стенок. В этом случае режущей будет только задняя стенка зерна. Стружкообразование передней стенкой возможно при износе зерна не менее чем на  $1/4$  его размера, до этого происходят только упругая и пластическая деформация обрабатываемого материала.

2. Действие сил на стенках зерна сферинокорунда имеет противоположный характер при изменении износа зерна по диаметру. По абсолютному значению при одинаковом переднем угле на режущих элементах зерна силы больше на передней стенке, чем на задней.

3. Начало процесса стружкообразования зависит не только от величины внедрения зерна в материал, износа зерна по диаметру, но и от коэффициентов трения на передней поверхности зерна и в плоскости стружкообразования.



4. Отношение нормальной составляющей силы резания к касательной меньше единицы на участке стружкообразования, а поскольку там силы значительно меньше, чем при других значениях суммы износа зерна и толщины срезаемой стружки, то применительно ко всему износу зерна нормальная составляющая силы резания больше касательной, как и для других абразивных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 221 с.  
Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrasive Wear*. Moscow, 1990. 221 p. (In Russ.).
2. Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В. Дереворежущие инструменты. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 332 с.  
Kamenev B.B., Sergeevichev A.V. *Wood-Cutting Tools*. Sankt Petersburg, SPbFTU Publ., 2013. 332 p. (In Russ.).
3. Кремьен З.И., Буторин Г.И., Коломазин В.М. и др. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом / под общ. ред. З.И. Кремья. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. 206 с.  
Kremen Z.I., Butorin G.I., Kolomazin V.M. et al. *Processing Technology with Abrasive and Diamond Tools*. Leningrad, Mashinostroyeniye, Leningr. otd. Publ., 1989. 206 p. (In Russ.).
4. Любимов В.Г. Шлифование слоистых пластмасс кругами с абразивными зёрнами из стекла // Резание и инструмент: междунар. науч.-техн. сб. Харьков, 2002. Вып. 10. С. 73–77.  
Lyubimov V.G. *Grinding of Laminated Plastics with Glass Abrasive Grains. Rezanie i instrument v texnologicheskix sistemax: mezhdunar. nauch.-texn. sb.*, 2002, no. 10, pp. 73–77. (In Russ.).
5. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.  
Maslov E.N. *Theory of Grinding Materials*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 320 p. (In Russ.).
6. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: ЛГУ, 1981. 144 с.  
Ostrovsky V.I. *Theoretical Bases of the Grinding Process*. Leningrad, PLSU Publ., 1981. 144 p. (In Russ.).
7. Рыбин Б.М., Санаев В.Г., Кириллов Д.В. К вопросу выбора параметров шероховатости для оценки неровностей древесины // Вестн. МГУЛ – Лесной вестн. 2012. № 4. С. 68–71.  
Rybin B.M., Sanaev V.G., Kirillov D.V. *To the Question of the Choice of Roughness Parameters for the Estimation of Woods Roughness. Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 4, pp. 68–71. (In Russ.).
8. Санев В.И., Каменев Б.Б., Сергеевичев А.В. Резание древесины и древесных материалов. СПб.: Лань, 2018. 456 с.  
Sanev V.I., Kamenev B.B., Sergeevichev A.V. *Cutting Wood and Wooden Materials*. Sankt Petersburg, Lan' Publ., 2018. 456 p. (In Russ.).
9. Demir H., Gullu A., Ciftci I., Seker U. An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces When Grinding. *Strojnicki vestnik = Journal of Mechanical Engineering*, 2010, vol. 56, iss. 7/8, pp. 447–454.
10. Ichida Y. Formation Mechanism of Grain Cutting Edges in Micro Dressing of Polycrystalline CBN Grinding Wheels. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 523–524, pp. 137–142. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.137>

11. Kivimaa E. Cutting Force in Woodworking. *The Stat. Inst. for Tech. Res.*, Helsinki, 2000, no. 18, pp. 78–91.
12. Korolev A.V., Vasin A.N., Nazar'eva V.A., Reshetnikova O.P. Cutting Geometry of Abrasive Grains. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 10, pp. 655–659. <https://doi.org/10.3103/S1068798X14100086>
13. Kryukov S.A., Kryukova A.S. Determining the Parameters of Grinding Wheels Working Surface Profile. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.461>
14. Leonov S.L., Markov A.M., Belov A.B., Sczygol N. Generalized Mathematical Model Predicting the Mechanical Processing Topography. *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering. Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, ISPCIME 2015, September 23–25, 2015, Kemerovo, Russia*. England, Bristol, IOP Publishing Ltd Publ., 2016, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012009>
15. Malkin S. *Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives*. New York, Industrial Press Publ., 2008. 372 p.
16. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Brent Beckley Inc. Cover Art Publ., 2004. 764 p. <https://doi.org/10.1016/B978-081551490-9.50003-7>
17. Narayanaperumal A., Lakshmanan V. Evaluation of the Working Surface of the Grinding Wheel Using Speckle Image Analysis. *Proceedings of the ASME 2015 International Conference on Manufacturing Science and Engineering (MSEC2015), 2015*. American Society of Mechanical Engineers Publ., 2015, Vol. 1: Processing, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1115/MSEC2015-9416>
18. Nguyen A.T., Butler D.L. Correlation of Grinding Wheel Topography and Grinding Performance: A Study from a Viewpoint of Three-Dimensional Surface Characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 208, iss. 1-3, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.128>
19. Novoselov Yu., Bratan S., Bogutsky V. Analysis of Relation Between Grinding Wheel Wear and Abrasive Grains Wear. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 809–814. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.116>
20. Sergeevichev A., Belonogova N., Sergeevichev V., Byzov V., Mikhailova A. Investigation of the Influence of Certain Factors on the Quality of Processing During Hard Grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Proceedings of the 5th Pan-Russian Scientific Technical Conference on Forests of Russia: Policy, Industry, Science and Education*. England, Bristol, IOP Publishing Ltd. Publ., 2020, vol. 574(1), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012072>

**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 674.812

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-155-161

## Упрочнение и стабилизация форм и размеров древесины осины и тополя карданолом

**В.А. Шамаев**<sup>1</sup>✉, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [Y-9044-2018](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

**О.Ф. Шишлов**<sup>2</sup>, *д-р техн. наук, проф., директор по науке и развитию*;

ResearcherID: [Y-4197-2019](https://orcid.org/0000-0002-4656-5969), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4656-5969>

<sup>1</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394036; drevstal@mail.ru✉

<sup>2</sup>ПАО «Уралхимпласт», Северное шоссе, д. 21, г. Нижний Тагил, Свердловская обл., Россия, 622051; o.shishlov@ucp.ru

Поступила в редакцию 19.04.22 / Одобрена после рецензирования 01.08.22 / Принята к печати 06.08.22

**Аннотация.** Наименее востребованными породами в РФ являются осина и тополь, запасы которых постоянно увеличиваются. Для использования в качестве заменителя ценной древесины твердых лиственных пород древесины осины и тополя необходимо увеличить примерно в 2 раза ее прочностные свойства и одновременно достичь стабильности форм и размеров. Наиболее распространенным способом стабилизации форм и размеров древесины является ее обработка уксусным ангидридом, поливиниловым спиртом, полиэтиленгликолем или гидротермическая обработка. Для увеличения прочности древесины применяется обработка феноло- и карбамидоформальдегидными мономерами, олигомерами и смолами. Стабилизация форм и размеров особенно важна для прессованной древесины: ее разбухание в воде в 8 раз превышает разбухание натуральной древесины. В качестве модификатора выбран карданол, получаемый из жидкости скорлупы орехов кешью или синтезированный. Разработана технология пропитки древесины карданолом, содержащим 2–3 % уксусной кислоты, с последующей термообработкой пропитанной древесины при температуре 140–150 °С в течение 6–8 ч. При этом происходит полимеризация карданола с компонентами лигноуглеводного комплекса древесины, что не только улучшает ее свойства, но и придает стабильность форм и размеров в среде с переменной влажностью. Для изучения кинетики использовали дифференциальный сканирующий калориметр Mettler Toledo DSC 823e/700. Измерения тепловых потоков проводили в закрытых стальных тиглях вместимостью 30 мл, способных выдержать давление пара до 15 МПа. На кривой теплового потока при скорости нагрева 10 °С/мин присутствует экзотермический пик с максимумом 150,7 °С. Модифицированная карданолом древесина осины имеет прочность при сжатии вдоль волокон 69 МПа, предельное объемное разбухание 2,6 %, предельное влагопоглощение 18 % при содержании карданола 15 % от массы сухой древесины. Предельное водопоглощение и предельное объемное разбухание древесины, пропитанной карданолом, находятся на одном уровне с соответствующими показателями модифицированной древесины марок Ассожа, Belmadur и Thermowood.

**Ключевые слова:** древесина, прочность древесины, осина, тополь, упрочняющая пропитка, карданол, пропитка карданолом, водопоглощение, влагопоглощение, прочность при сжатии

*Для цитирования:* Шамаев В.А., Шишлов О.Ф. Упрочнение и стабилизация форм и размеров древесины осины и тополя карданолом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 155–161. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-155-161>

Original article

## Hardening and Stabilization of Volumetric Properties in Aspen and Poplar Wood with Cardanol

*Vladimir A. Shamaev*<sup>1</sup>✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Y-9044-2018](https://orcid.org/0000-0002-1762-7956),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

*Oleg F. Shishlov*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof., Director for Science Development;

ResearcherID: [Y-4197-2019](https://orcid.org/0000-0002-4656-5969), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4656-5969>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394036, Russian Federation; [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)✉

<sup>2</sup>PJSC “Uralchimplast”, Severnoe sh., 21, Nizhny Tagil, Sverdlovsk region, 622051, Russian Federation; [o.shishlov@ucp.ru](mailto:o.shishlov@ucp.ru)

*Received on April 19, 2022 / Approved after reviewing on August 01, 2022 / Accepted on August 06, 2022*

**Abstract.** Aspen and poplar are the least required types of wood in the Russian Federation, whose stock is continually expanding. Such wood can be used as a substitute for valuable hardwood, but in this case the strength must be almost doubled while achieving stability in shape and size. Treatment with acetic anhydride, polyvinyl alcohol, polyethylene glycol, or hydrothermal care are the most common methods for maintaining the volumetric stability of the wood. Treatment with phenol- and urea-formaldehyde monomers, oligomers, and resins is typically done for strength improvement. The stabilization of the dimensional parameters is especially critical for pressed wood, which has 8 times greater swelling in water than raw wood. Cardanol was chosen as a modifier. It can be derived from cashew nutshell liquid or synthesized. The established technique for impregnating wood with cardanol includes 2–3 % acetic acid, followed by heat treatment at 140–150 °C for 6–8 hours. During this process, cardanol polymerizes with components of the lignocarbhydrate complex of the wood, which does not only improve its characteristics but also provides form and size stability in an environment with changeable humidity. A Mettler Toledo DSC 823e/700 differential scanning calorimeter was used to examine the kinetics. Heat fluxes were measured in 30 µl sealed steel crucibles that could sustain steam pressure up to 15 MPa. At a heating rate of 10 °C/min, the heat flow curve showed an exothermic peak with a maximum temperature of 150.7 °C. Aspen wood with 15 % cardanol content has a compressive strength along the fibers of 69 MPa, a volume swelling limit of 2.6 %, and a moisture absorption limit of 18 %. The ultimate water absorption and ultimate volumetric swelling of wood impregnated with cardanol are comparable to the relevant indications of the modified wood brands Accoja, Belmadur, and Thermowood.

**Keywords:** wood, wood strength, aspen, poplar, hardening impregnation, cardanol, cardanol impregnation, water absorption, moisture absorption, compressive strength

**For citation:** Shamaev V.A., Shishlov O.F. Hardening and Stabilization of Volumetric Properties in Aspen and Poplar Wood with Cardanol. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 155–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-155-161>



*Введение*

В Российской Федерации хвойные леса после вырубki зарастают осиной и тополем, реже березой. При лесозаготовках бóльшая часть древесины осины и тополя остается гнить на лесосеках, так как древесина этих пород не находит широкого применения из-за низкой прочности и склонности к загниванию. Наиболее распространенным способом стабилизации форм и размеров древесины является ее обработка уксусным ангидридом, поливиниловым спиртом, полиэтиленгликолем [4, 6, 8] или гидротермическая обработка [5, 19]. Но данные способы не позволяют увеличить прочность древесины. Для этого применяется обработка феноло- и карбамидоформальдегидными мономерами, олигомерами и смолами [9, 10, 14]. Однако эти способы высоко токсичны, получаемая модифицированная древесина также характеризуется токсичностью.

В последнее время взамен карбамидоформальдегидных и фенолоформальдегидных смол в производстве плитных материалов (ДСтП, ДВП, МДФ, ОСП) используется карданол, получаемый из жидкости скорлупы орехов кешью или синтезированный [2, 7, 11]. Карданол является нетоксичным органикорастворимым олигомером, в кислой среде он полимеризуется, образуя 3-мерную сетку (рис. 1). Поскольку при полимеризации присутствуют активные гидроксильные группы и двойные связи, велика вероятность «сшивки» образующегося полимера с активными группами компонентов древесины, что увеличит формостабильность модифицированной древесины даже при малом содержании в ней карданолола [1, 3, 12, 15].

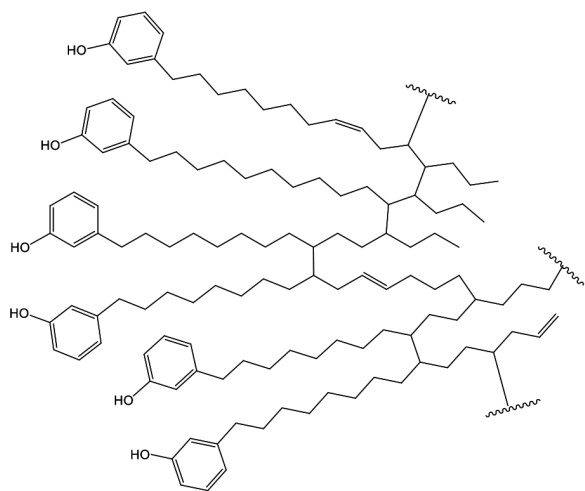


Рис. 1. Фрагмент структуры продукта полимеризации карданолола

Fig. 1. Fragment of cardanol polymerization product structure

*Объекты и методы исследования*

Изучена катионная полимеризация карданолола, катализируемая ледяной уксусной кислотой в количестве 3 % от массы карданолола. Для исследования кинетики использовали дифференциальный сканирующий калориметр Mettler Toledo DSC 823e/700. Измерения тепловых потоков проводили в закрытых стальных тиглях вместимостью 30 мкл, выдерживающих давление пара до 15 МПа. Динамические ДСК-измерения (ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия) осуществляли при скоростях нагрева 5, 10 и

20 °С/мин в диапазоне температур от 25 до 250 °С. Масса навесок образцов была в пределах 4–6 мг. Кинетические расчеты выполняли по известным алгоритмам [1, 12, 13, 18].

В качестве сырья использовали древесину тополя и осины *Populus tremula* L. плотностью соответственно 390 и 495 кг/м<sup>3</sup> в виде брусков размерами 30×120×200 мм (последний размер – вдоль волокон) и влажностью 12 %. Раствор карданола готовили путем добавления в него 3%-й ледяной уксусной кислоты. В качестве контроля использовали стандартную фенолоформальдегидную смолу СФЖ-3016 [17].

Образцы загружали в лабораторный автоклав емкостью 10 л, куда с избытком заливали модифицирующий раствор, подогретый до 65 °С. Пропитку древесины проводили при давлении 15 атм в течение 3 мин, после чего давление сбрасывали до атмосферного, далее следовала выдержка 15 мин и процесс повторяли.

Пропитанные бруски высушивали в термощкафу при температуре 90 °С в течение 8 ч до влажности 6 % и подвергали термообработке при температуре 140–170 °С в течение 4–8 ч (при 170 °С – 4 ч, при 140 °С – 8 ч). После этого из брусков изготавливали образцы 15×15×22,5 мм (последний размер – вдоль волокон), которые испытывали на водо- и влагопоглощение, линейное и объемное разбухание, предел прочности при сжатии вдоль волокон, статическую твердость по ГОСТ 25579–83, ГОСТ 21573.5–77, ГОСТ 21523.6–77, ГОСТ Р 54577 54577–2011, ГОСТ Р 55657–2013. Для каждой серии использовали 8 образцов. Результаты эксперимента обрабатывали методом вариационной статистики [16].

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость продолжительности протекания реакции полимеризации карданола в присутствии катализатора – уксусной кислоты – от температуры и степени превращения  $\alpha$ . На кривой ДСК при скорости нагрева 10 °С/мин присутствует экзотермический пик с максимумом 150,7 °С. На основании полученных данных можно рекомендовать проведение реакции полимеризации карданола в процессе производства модифицированной древесины при температуре от 150 °С.

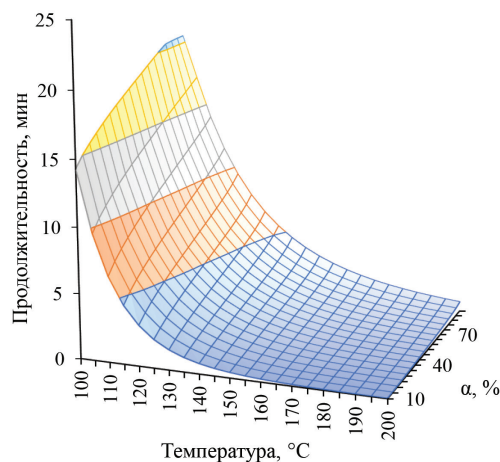


Рис. 2. Зависимость продолжительности реакции полимеризации карданола в присутствии катализатора – уксусной кислоты – от температуры и степени превращения

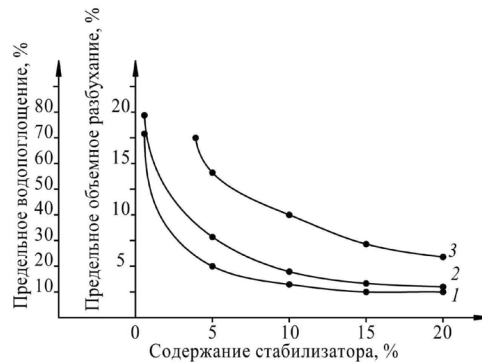
Fig. 2. The surface dependence of cardanol polymerization reaction time on the temperature and degree of conversion  $\alpha$  in the presence of a catalyst (acetic acid)



Сравнение ИК-спектров карданола и продуктов реакции его олигомеризации указывает на снижение количества двойных связей в  $C_{15}$ -заместителе, что подтверждает протекание полимеризации карданола через раскрытие двойных связей в боковой цепи с образованием олигомерного продукта (рис. 1).

Предельное объемное разбухание и предельное водопоглощение модифицированной древесины функционально зависят от содержания карданола или фенолоформальдегидной смолы СФЖ-3016 (рис. 3). Как видно из рис. 3, оптимальное содержание стабилизатора составляет 15 % от массы сухой древесины. Дальнейшее увеличение содержания стабилизатора незначительно снижает водопоглощение и объемное разбухание.

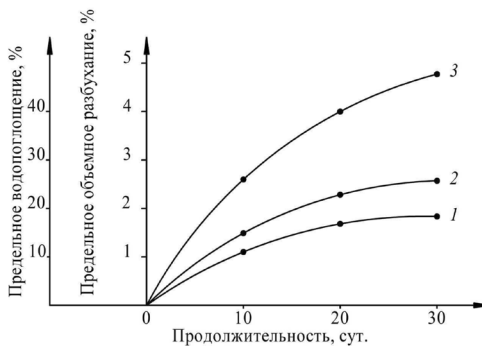
Рис. 3. Зависимость для древесины осины: 1, 2 – соответственно предельного объемного разбухания и предельного водопоглощения от содержания карданола; 3 – предельного объемного разбухания от содержания фенолоформальдегидной смолы СФЖ-3016



На рис. 4 показана кинетика объемного разбухания и водопоглощения древесины, пропитанной карданолом и СФЖ-3016, во времени при содержании стабилизатора 15 % от массы сухой древесины. Предельное объемное разбухание и предельное водопоглощение древесины, пропитанной карданолом, как показывает рис. 4, находятся на одном уровне с соответствующими показателями модифицированной древесины марок Ассожа, Belmadur и Thermowood. Интересно отметить, что при влагопоглощении предельное объемное разбухание древесины осины, стабилизированной карданолом, составляет 2 %, а предельное водопоглощение – 10 %.

Рис. 4. Зависимость от продолжительности пребывания в воде: 1, 2 – соответственно предельного водопоглощения и предельного объемного разбухания древесины осины, пропитанной карданолом; 3 – предельного объемного разбухания древесины, пропитанной смолой СФЖ-3016

Fig. 4. Dependence for impregnated aspen wood on time spent in water: 1, 2 – of ultimate water absorption and ultimate volumetric swelling of wood with cardanol content, respectively; 3 – of ultimate volumetric swelling of wood with phenol-formaldehyde resin PPLR-3016



Пропитка древесины осины и тополя существенно улучшает прочностные свойства древесины. В таблице приведены прочностные показатели древесины осины и тополя, содержащей 15 % карданола от массы сухой древесины.

**Прочностные показатели древесины осины и тополя**  
**The strength characteristics of aspen and poplar woods**

Показатель	Числовые значения показателя при влажности древесины 6 %			
	осина		тополь	
	натуральная	модифицированная	натуральная	модифицированная
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	500	590	370	430
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	46	69	43	61
Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	8,7	13,3	4,1	11,0
Твердость торцовая, Н/мм <sup>2</sup>	26,3	40,9	26,7	42,2

Как видно из таблицы, после пропитки древесины карданолом ее плотность увеличивается на 15 %, а прочностные показатели – в 1,5–1,8 раза, и по этим показателям модифицированная древесина осины и тополя соответствует древесине бука, т. е. ее свойства приближаются к свойствам древесины твердых лиственных пород.

*Выводы*

1. Пропитка древесины осины и тополя карданолом и последующая термообработка приводят к образованию нового древеснополимерного материала – модифицированной древесины с оптимальным содержанием карданола 15 %.

2. Модифицированная карданолом древесина осины отличается низкими показателями предельного водопоглощения (18 %) и предельного объемного разбухания (2,6 %).

3. После обработки древесины осины и тополя карданолом плотность материала увеличивается на 15 %, а предел прочности при сжатии – в 1,5–1,8 раза, что соответствует прочностным показателям древесины бука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Патент № 2131351 С1 РФ, МПК В27К 3/50 (1995.01). Способ получения модифицированной древесины: № 97118641/04: заявл. 19.11.1997: опубл. 10.06.1999 / В.И. Ткаченко, Д.В. Канцелярист, О.А. Шамаев, В.А. Шамаев, В.Ф. Суранов, Е.В. Облонский, В.В. Канцелярист.

Tkachenko V.I., Kancelyarist D.V., Shamaev O.A., Shamaev V.A., Suranov V.F., Oblonskij E.V., Kancelyarist V.V. *Modified Wood Manufacture Method*. Patent RF, no. RU 2131351, 1999. (In Russ.).

2. Шамаев В.А. Получение модифицированной древесины химико-механическим способом и исследование ее свойств // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 4(20). С. 177–187.

Shamaev V.A. Receiving Modified Wood Chemi-Mechanical Process and Investigation of Its Properties. *Lesotexnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2015, vol. 5, no. 4(20), pp. 177–187. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/17421>

3. Шамаев В.А., Златоустовская В.В., Копытин А.С. Стабилизация форм и размеров прессованной древесины химическими методами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 115–121.

Shamaev V.A., Zlatoustovskaya V.V., Kopytin A.S. Stabilization of Forms and Dimensions of Pressed Wood by Chemical Methods. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 2, pp. 115–121. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/c0a/c0a8edd78e32d56f8e33156dcb78c9d7.pdf>

4. ACCOYA. Official website. Available at: <https://www.accoya.com/why-accoya/benefits/> (accessed 12.07.22).
5. Deka M., Saikia C.N. Chemical Modification of Wood with Thermosetting Resin: Effect on Dimensional Stability and Strength Property. *Bioresource Technology*, 2000, vol. 73, no. 2, pp. 179–181. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00167-4)
6. Gry A., Westin M. Durability of Modified Wood – Laboratory vs Field Performance. *Proceedings of the Fourth European Conference on Wood Modification*. Sweden, SP Technical Research Institute Publ., 2009, pp. 515–522.
7. Igaz R., Macek Š., Zemiari J. The Influence of Unidirectional Cyclic Bend Loading on Initial Relaxation Speed of Beech Lamellas. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2014, vol. 56, pp. 27–35.
8. KEBONY. Official website. Available at: <https://us.kebony.com/> (accessed 12.07.22).
9. Kúdela J., Rešetka M. Influence of Pressing Parameters on Dimensional Stability and Density of Compressed Beech Wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, no. 4, pp. 1241–1252. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1298-8>
10. Lekounougou S., Kocafe D., Oumarou N., Kocafe Y., Poncsak S. Effect of Thermal Modification on Mechanical Properties of Canadian White Birch (*Betula papyrifera*). *International Wood Products Journal*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 101–107. <https://doi.org/10.1179/2042645311Y.0000000016>
11. Papadopoulos A., Mantanis G. Vapour Sorption Studies of Belmadur Wood. *Advances in Forestry Letter (AFL)*, 2012, vol. 1, iss. 1, pp. 1–6.
12. Polilov A.N., Dornyak O.R., Shamaev V.A., Rumachik M.M. Justification of the Production Process of Pressed Wood and Study of Its Properties. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 221–230. <https://doi.org/10.1007/s11029-018-9733-9>
13. Risfaheri R., Tun T., Nur M., Saillah I. Isolation of Cardanol from Cashew Nutshell Liquid Using the Vacuum Distillation Method. *Indonesian Journal of Agriculture*, 2009, no. 2, pp. 11–20.
14. Sandberg D., Haller P., Navi P. Thermo-Hydro and Thermo-Hydro-Mechanical Wood Processing: An Opportunity for Future Environmentally Friendly Wood Products. *Wood Material Science and Engineering*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 64–88. <https://doi.org/10.8017480272.2012.751935>
15. Shamaev V.A., Medvedev I.N., Parinov D.A. Study of Modified Wood as a Bearing Material for Machine-Building. *Proceedings of the International Conference “Aviamechanical Engineering and Transport”*, AVENT, 2018. Atlantis Press Publ., 2018, pp. 478–482. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.92>
16. Shamaev V.A., Medvedev I.N., Parinov D.A. Changing Wood Texture with Combination of Selective Treatment and Pressing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publ., 2021, vol. 875, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012057>
17. Shamaev V.A., Medvedev I.N., Parinov D.A., Shakirova O.I., Anisimov M.V. Investigation of Modified Wood as a Material Power Transmission Pole Produced by Self-Pressing Method. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2018, vol. 60, no. 2, pp. 25–32. <https://doi.org/10.17423/afx.2018.60.2.02>
18. Tyman J.H., Kiong L.S. Long Chain Phenols: Part XI. Composition of Natural Cashew Nutshell Liquid (*Anacardium occidentale*) from Various Sources. *Lipids*, 1978, vol. 13, no. 8, pp. 525–532. <https://doi.org/10.1007/BF02533591>
19. Zhenhua G., Dong L. Chemical Modification of Poplar Wood with Foaming Polyurethane Resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 104, no. 5, pp. 2980–2985. <https://doi.org/10.1002/app.25963>

**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



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

Научная статья

УДК 676.168

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-162-172

### Поверхностная обработка картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения

**Е.А. Топтунов**<sup>✉</sup>, инж. ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»; ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

**Ю.В. Севастьянова**, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

**К.С. Вашукова**, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [G-1760-2019](https://orcid.org/0000-0002-7916-2410), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-2410>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; zhenyatope@gmail.com<sup>✉</sup>, y-sevastyanova@yandex.ru, k.bolotova@narfu.ru

Поступила в редакцию 05.07.22 / Одобрена после рецензирования 08.10.22 / Принята к печати 11.10.22

**Аннотация.** Исследованы порошковые целлюлозные материалы, а именно наноцеллюлоза из сырья растительного и бактериального происхождения. Для получения нанопрепаратов целлюлозы проводили гидролиз концентрированными кислотами образцов беленой сульфатной хвойной и лиственной целлюлозы, представленных в линейках крупных целлюлозно-бумажных предприятий России, а также бактериальной целлюлозы, произведенной из культур *Medusomyces gisevii* в лабораторных условиях. Методом микроскопии определены размерные характеристики, визкозиметрически – степень полимеризации. Для беленой хвойной целлюлозы длина частиц наноцеллюлозы составляет 80...200 нм при диаметре частиц 80...100 нм, степень полимеризации – 60. Для беленой лиственной целлюлозы длина частиц – 80...150 нм при диаметре частиц 70...100, степень полимеризации – 50. Для бактериальной целлюлозы длина частиц – 120...250 нм, диаметр частиц – 70...120 нм, степень полимеризации – 110. Из препаратов наноцеллюлозы изготавливали суспензии различной концентрации (от 1 до 10 %), которые использовали в качестве армирующей добавки в образцы картона. Суспензию наноцеллюлозы наносили на поверхность целлюлозы в 1–2 слоя. Добавки препаратов наноцеллюлозы приводили к снижению разрывной длины (от 9,6 до 40,4 %) при увеличении плотности картона (от 6,3 до 23,8 %), жесткости при растяжении (от 14,0 до 25,0 %) и сопротивления продавливанию (до 31,9 %). Лучшие результаты достигнуты при использовании суспензии наноцеллюлозы из хвойной беленой целлюлозы, нанесенной на поверхность картона в 2 слоя: наблюдали снижение разрывной длины на 9,6 % при увеличении плотности на 23,8 %, жесткости при растяжении на 25,0 %, сопротивления продавливанию на 31,9 % относительно образца без добавки. Таким образом, показана возможность использования суспензий наноцеллюлозы, полученных из



сырья растительного и бактериального происхождения методом кислотного гидролиза, для поверхностной обработки картона.

**Ключевые слова:** порошковые целлюлозные материалы, нанокристаллическая целлюлоза, нанофибриллярная целлюлоза, бактериальная наноцеллюлоза, степень помола, степень полимеризации, структурно-морфологические характеристики

**Благодарности:** Исследование проведено с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» и ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

**Для цитирования:** Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В., Вашукова К.С. Поверхностная обработка картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 162–172. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-162-172>

Original article

## Surface Treatment of Cardboard with Plant and Bacterial Derived Nanocellulose Suspensions

**Evgeniy A. Toptunov**<sup>✉</sup>, Engineer; ResearcherID: [ABE-4069-2020](https://orcid.org/0000-0001-8441-788X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8441-788X>

**Yuliya V. Sevastyanova**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-4746-2020](https://orcid.org/0000-0002-1806-9052), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1806-9052>

**Ksenia S. Vashukova**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-1760-2019](https://orcid.org/0000-0002-7916-2410), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-2410>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [zhenyatope@gmail.com](mailto:zhenyatope@gmail.com)<sup>✉</sup>, [y-sevastyanova@yandex.ru](mailto:y-sevastyanova@yandex.ru), [k.bolotova@narfu.ru](mailto:k.bolotova@narfu.ru)

Received on July 05, 2022 / Approved after reviewing on October 08, 2022 / Accepted on October 11, 2022

**Abstract.** This study investigates powdered cellulose materials, particularly nanocellulose derived from plant and bacterial sources. The nanocellulose was generated by hydrolyzing bleached sulphate softwood and hardwood pulp samples with strong acids. The original materials are present in the product lines of leading Russian pulp and paper companies. The bacterial cellulose was produced under laboratory conditions from *Medusomyces gisevii*. The dimensional parameters of the nanocellulose samples were evaluated using electron microscopy, and the degree of polymerization was measured by determining the viscosity of the cellulose solutions in cadoxene. The bleached softwood pulp had a nanocellulose particle length of 80–200 nm, a particle diameter of 80–100 nm, and a degree of polymerization of 60. The bleached hardwood pulp had a particle length of 80–150 nm, a particle diameter of 70–100 nm, and a degree of polymerization of 50. The bacterial nanocellulose had a particle length of 120–250 nm, a particle diameter of 70–120 nm, and a degree of polymerization of 110. Suspensions of various concentrations (from 1 to 10 %) were prepared from nanocellulose samples, which were subsequently used as reinforcing additives in cardboard samples. The additive was applied to the surface in one or two layers. Additives of nanocellulose preparations reduced the breaking length (from 9.6 to 40.4 %) along with an increase in cardboard density (from 6.3 to 23.8 %), tensile rigidity (from 14.0 to 25.0 %) and bursting strength (up to 31.9 %). The best results were obtained by applying a nanocellulose suspension of bleached



softwood pulp to the board surface in two layers: a 9.6 % decrease in breaking length was observed with an increase in density of 23.8 %, tensile rigidity of 25.0 %, and bursting resistance of 31.9 % relative to the control sample. Therefore, the study showed the possibility of using nanocellulose suspensions derived from plants and bacterial sources by acid hydrolysis for the surface treatment of cardboard.

**Keywords:** powdered cellulose materials, nanocrystalline cellulose, nanofibrillar cellulose, bacterial nanocellulose, freeness value, degree of polymerization, structural and morphological characteristics

**For citation:** Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V., Vashukova K.S. Surface Treatment of Cardboard with Plant and Bacterial Derived Nanocellulose Suspensions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 162–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-162-172>

### *Введение*

Целлюлоза представляет собой наиболее распространенное в природе органическое вещество, которое содержится в древесине хвойных и лиственных пород, в недревесных растениях. Целлюлоза может быть синтезирована некоторыми видами микроорганизмов, а также присутствует в туниках оболочников (туницин).

В последнее время наблюдается интерес к продуктам модификации целлюлозы – порошковым целлюлозным материалам, к которым относится наноцеллюлоза. Выделяют такие типы наноцеллюлозы, как нанокристаллическая (НКЦ), нанофибриллярная, бактериальная (БНЦ), животного происхождения – из туницина. Одним из основных способов получения нанокристаллической целлюлозы является кислотный гидролиз [8].

Наноцеллюлоза отличается от микрокристаллической и порошковой целлюлозы более высоким индексом кристалличности, низкими степенью полимеризации и размерами частиц, находящимися в наноразмерном диапазоне. Средняя степень полимеризации, характерная для наноцеллюлозы, составляет 80...120. Нанокристаллическая целлюлоза имеет форму короткого стержня (вискера) диаметром 2...20 нм (по другим данным – до 100 нм) и длиной 100...500 нм. Нанофибриллярная целлюлоза представляет собой длинные гибкие нановолокна целлюлозы с диаметром до 100 нм и длиной до нескольких микрон [8, 10, 12, 18, 19].

К областям применения наноцеллюлозы относятся целлюлозно-бумажная [6] и пищевая промышленности [5], производство полимерных материалов [11, 22, 23], медицина [15, 16], а также создание новых композитов [20] и модификация поверхностей материала [14, 17, 21]. Исследуют [3, 13] возможность разработки широкого спектра функциональных материалов, полученных темплатным синтезом на основе НКЦ.

В настоящее время активно развивается использование наноцеллюлозы в композиции бумаги/картона. Наноцеллюлоза, ее суспензии и гидрогели могут быть как введены в массу, так и нанесены поверхностно. В зависимости от точки и способа введения наноцеллюлозы она может оказывать различный эффект. Исследователями ранее рассмотрена возможность введения гидрогелей наноцеллюлозы на стадии формования бумажного и картонного полотна в



мокрой части машины, при этом было показано положительное влияние на степень удержания минеральных наполнителей и мелкого волокна в полотне. Отмечено повышение ключевых показателей качества массовых видов бумаги и картона [1]: например, добавка нанофибриллярной целлюлозы в композицию бумаги для гофрирования привела к увеличению показателей качества [7]. Известно использование нанофибриллярной целлюлозы для оптимизации водоудержания и реологических свойств меловальных составов в производстве тонкой мелованной бумаги [9]. Рассматривают [2] возможность создания композиционной бумаги на основе бактериальной наноцеллюлозы и растительной целлюлозы. Такие образцы бумаги получены при различном соотношении бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы. Для образцов наблюдали увеличение прочностных характеристик (сопротивление продавливанию, жесткость при растяжении, работа разрушения, разрывная длина).

Цель – оценка влияния поверхностной обработки картона суспензиями наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения на его прочностные характеристики.

#### *Объекты и методы исследования*

В качестве исходных образцов растительной целлюлозы использовали образцы беленой хвойной и лиственной сульфатной целлюлозы, предоставленные целлюлозно-бумажными предприятиями России.

Получение препаратов растительной наноцеллюлозы проводили методом кислотного гидролиза, который осуществляли с помощью ротационного испарителя Heidolph Hei-VAP Advantage (Германия) согласно методике, описанной в работе [4]. Отличием от метода [4] было применение предварительного размола на мельнице PFI (Россия) вместо ручного измельчения исходной целлюлозы, а также замена разделения суспензии на гомогенизаторе выпариванием в сушильном шкафу. Размол осуществляли до достижения предельной степени помола ( $\geq 85$  °ШР). Гидролиз проводили 75%-й серной кислотой, причем объем кислоты взят таким образом, что ее концентрация в целлюлозной суспензии составляла 40 % (учитывалась влажность навески целлюлозы). Обработку осуществляли в течение 1 ч при 80 °С, после чего суспензию 10-кратно разбавляли водой, центрифугировали, доводили рН до 5...6, вновь центрифугировали и выпаривали при 90 °С в течение 48...72 ч.

У полученных препаратов наноцеллюлозы определяли содержание сухого вещества, структурно-морфологические характеристики, степень полимеризации и методом микроскопии – размеры и параметры микро-структуры.

Бактериальную целлюлозу (БЦ) получали микробиологическим способом. В качестве продуцента БЦ использовали симбиотическую культуру *Medusomyces gisevii*, состоящую из уксуснокислых бактерий и дрожжей. Для культивирования биомассы клеток с последующим биосинтезом БЦ брали питательную среду состава: сахароза – 19 г/л,  $K_2HPO_4$  – 4 г/л, пептон – 1 г/л, дрожжевой экстракт – 1 г/л. Культивирование биомассы продуцентов целлюлозы осуществляли при рН 6 и температуре 18...21 °С.

Эффективность биосинтеза целлюлозы оценивали визуально по увеличению ее массы в культуральной среде. Бактериальную целлюлозу, синтезированную на поверхности культуральной среды в виде гель-пленки, промывали водой до нейтральной среды и замораживали для хранения и последующего гидролиза.

Гидролиз образцов БЦ проводили в течение 4 ч аналогично описанному выше гидролизу с использованием серной или 2,5 н соляной кислоты.

Степень полимеризации препаратов определяли путем измерения вязкости растворов образцов целлюлозы в кадоксене согласно ГОСТ 25438–82. Установление структурно-морфологических характеристик волокна осуществляли с использованием анализатора FiberTester согласно ISO 16065-2:2014. Оценку размера и формы частиц наноцеллюлозы и исследование микроморфологической структуры целлюлозы выполняли методом электронной микроскопии на сканирующем микроскопе высокого разрешения SEM Sigma VP ZEISS (ускоряющее напряжение – 10 кВ, детектор – InLens).

Для изучения возможности применения препаратов наноцеллюлозы в качестве армирующей добавки в картон изготавливали лабораторные отливки картона с добавлением суспензии препаратов. Образцы картона получали из беленой хвойной сульфатной целлюлозы согласно ГОСТ 14363.4–89. Масса отливки составляла 120 г/м<sup>2</sup>. Концентрация суспензии препаратов наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения, добавляемой при изготовлении картона, – от 1 до 10 %. Дозировка суспензий препаратов наноцеллюлозы: 2 г абсолютно сухого препарата наноцеллюлозы на образец картона массой 3,5 г. Нанесение суспензий наноцеллюлозы на поверхность образцов картона осуществляли с использованием пульверизатора. В 1 слой суспензию наносили на высушенный образец картона с последующим досушиванием. В случае нанесения в 2 слоя 1-й слой наносили на влажный образец, а 2-й – на высушенный с последующим досушиванием.

Для оценки эффекта добавки наноцеллюлозы в картон измеряли прочностные характеристики и сопоставляли их с контрольным образцом (лабораторные отливки без добавления наноцеллюлозы). Определение прочностных характеристик картона при растяжении осуществляли согласно ГОСТ ИСО 1924-1–96; сопротивления продавливанию – согласно ГОСТ Р ИСО 2759–2017.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Для оценки влияния предварительного (предгидролизного) механического размола на характеристики целлюлозной массы растительного происхождения определяли структурно-морфологические характеристики волокон до и после размола на мельнице PFI (табл. 1).

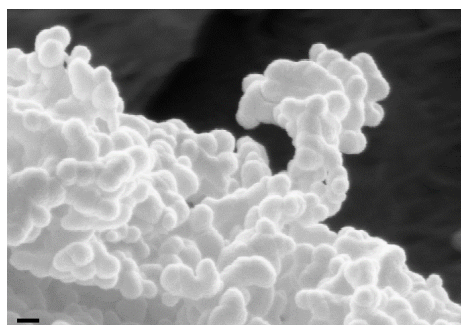
В процессе водного размола на мельнице PFI средняя длина волокон всех образцов снизилась, причем для хвойного образца – на 24,9 %, для лиственного – на 17,1 %. Для образца лиственной целлюлозы значительно увеличилось количество мелочи – на 4,2 %. Несмотря на то, что окончанием размола планировали считать точку 90 °ШР, ни для одного из образцов не удалось достичь степени помола выше 86 °ШР.

Таблица 1

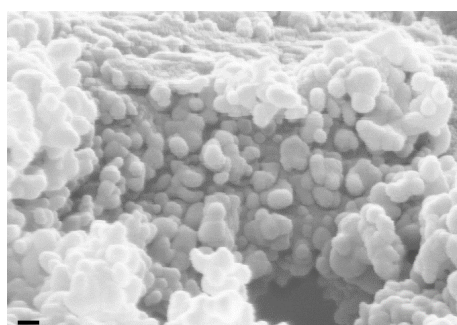
**Структурно-морфологические характеристики волокна до и после PFI размола**  
**Structural and morphological characteristics of the fiber before and after the PFI grinding**

Беленая целлюлоза	Среднее значение показателя			Грубость	Доля мелочи, %
	длина, мм	ширина, мкм	фактор формы, %		
<i>До размола</i>					
Хвойная	2,243	26,9	82,5	205	4,3
Лиственная	0,888	21,2	89,8	137	3,2
<i>Размол до степени помола <math>\geq 85</math> °ШР</i>					
Хвойная	1,685	29,2	81,4	150	5,0
Лиственная	0,736	26,6	82,9	140	7,4

После механического размола подбирали параметры гидролиза образцов растительной целлюлозы. Гидролиз образцов бактериальной целлюлозы проводили без предварительной механической обработки. На рисунке представлена структура препаратов наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения.



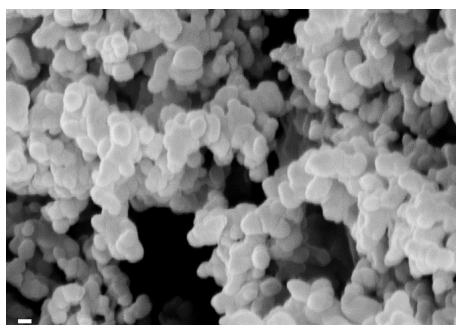
а



б

Структура образцов наноцеллюлозы: а – беленая хвойная целлюлоза; б – беленая лиственная целлюлоза; в – бактериальная целлюлоза. Масштабная линейка – 100 нм

The structure of nanocellulose samples: а – bleached softwood pulp; б – bleached hardwood pulp; в – bacterial cellulose. Scale bar – 100 nm



в

На основании результатов микроскопического исследования можно сделать вывод о схожести формы частиц препаратов наноцеллюлозы вне зависимости от используемого сырья. Сравнительные характеристики размеров наночастиц препаратов наноцеллюлозы растительного и бактериального происхождения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристика препаратов наноцеллюлозы**  
**Characteristic of nanocellulose samples**

Наноцеллюлоза	Диапазон размеров частиц препарата, нм		Степень полимеризации
	длина	диаметр	
Беленая хвойная	80...200	80...100	60
Беленая лиственничная	80...150	70...100	50
Бактериальная	120...250	70...120	110

Установлено (табл. 2), что диапазон размеров наночастиц и степень полимеризации соответствуют показателям, характерным для нанокристаллической целлюлозы.

Из полученных препаратов наноцеллюлозы готовили суспензии, которые использовали в качестве армирующей добавки в картон. В ходе предварительных экспериментов с суспензией препарата наноцеллюлозы из хвойной беленой целлюлозы с концентрациями от 1 до 10 % было определено, что оптимальной концентрацией суспензии является 5 %. Использование 5%-й суспензии позволило увеличить: жесткость картона – на 30,0 %, сопротивление продавливанию – на 25,0 %, плотность – на 25,4 % относительно исходного образца, при этом разрывная длина уменьшается на 8,8 % (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние концентрации суспензии препарата наноцеллюлозы (поверхностное нанесение в 1 слой) на характеристики качества картона**  
**Effect of nanocellulose suspension concentration (single-layer surface treatment) on the quality characteristics of the cardboard**

Концентрация суспензии наноцеллюлозы, %	Характеристика картона		Показатели механической прочности картона		
	средняя толщина, мкм	плотность, г/см <sup>3</sup>	разрывная длина, м	жесткость при растяжении, кН/м	сопротивление продавливанию, кПа
Без добавки	180	0,63	5100	500	240
1		0,62		510	250
5		0,79		650	300
7	170	0,76	4350	525	250
10	180	0,66	5000	550	230

Добавка 1%-й суспензии наноцеллюлозы (табл. 3) практически не приводит к изменению показателей механической прочности. Добавки 7 и 10%-й суспензии наноцеллюлозы снижают разрывную длину на 14,7 и 2,0 % соответственно, при этом увеличение жесткости при растяжении и сопротивления продавливанию для 7%-й суспензии составляет 5,0 и 4,2 % относительно образца без добавки соответственно, для 10%-й суспензии наблюдается повышение жесткости при растяжении на 10,0 %, а также снижение сопротивления продавливанию на 4,2 %. Для 7%-й суспензии отмечено увеличение плотности на 20,6 %, для 10%-й суспензии – на 4,8 % относительно образца без добавки.

Использование поверхностного нанесения суспензий препаратов нано-целлюлозы с концентрацией 5 % в 2 слоя позволило повысить сопротивление продавливанию (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние препаратов наноцеллюлозы на характеристики качества картона  
(поверхностное нанесение в 2 слоя)**

**Effect of different nanocellulose additives on cardboard characteristics  
(two-layer surface treatment)**

Наноцеллюлоза	Характеристики картона		Показатели механической прочности картона		
	средняя толщина, мкм	плотность, г/см <sup>3</sup>	разрывная длина, м	жесткость при растяжении, кН/м	сопротивление продавливанию, кПа
Контрольный образец (без добавок)	180	0,63	5200	500	235
Хвойная беленая		0,78	4700	625	310
Лиственная беленая		0,69	4500	570	175
БНЦ, полученная гидролизом: серной кислотой		0,70	3250	470	160
соляной кислотой		0,67	3100	450	180

В целом добавки препаратов наноцеллюлозы (табл. 4) приводили к снижению разрывной длины (от 9,6 до 40,4 %) при увеличении плотности картона (от 6,3 до 23,8 %), жесткости при растяжении (от 14,0 до 25,0 %) и сопротивления продавливанию (до 31,9 %). Следует отметить, что увеличение всех трех параметров наблюдалось только при поверхностном нанесении суспензии наноцеллюлозы из хвойной белой целлюлозы. При получении картона добавка БНЦ по сравнению с добавками растительной наноцеллюлозы не оказала значительного влияния на его прочностные характеристики. Ранее [2] рассматривали создание композиционной бумаги на основе хвойной целлюлозы и бактериальной наноцеллюлозы. При использовании поверхностного нанесения суспензии БНЦ было отмечено увеличение прочностных характеристик бумаги. По сравнению с растительной наноцеллюлозой добавка БНЦ при поверхностном нанесении менее эффективна для улучшения качественных характеристик картона.

#### *Выводы*

1. Для повышения качественных показателей картона оптимальной является концентрация суспензий растительных и бактериальной наноцеллюлоз 5 %.

2. При поверхностном нанесении препаратов наноцеллюлозы растительного происхождения в 1–2 слоя наблюдается увеличение плотности и прочностных характеристик картона (жесткость при растяжении, сопротивление продавливанию) при небольшом снижении разрывной длины.



3. Наибольшее влияние на усиление прочностных свойств оказывает наноцеллюлоза из хвойной беленной целлюлозы, нанесенная на поверхность картона в 2 слоя, при этом плотность увеличивается на 23,8 %, жесткость при растяжении – на 25,0 % и сопротивление продавливанию – на 31,9 %.

4. Наноцеллюлоза бактериального происхождения не оказывает влияния на прочностные характеристики картона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воскобойников И.В., Кондратьев В.А., Никольский С.Н., Константинова С.А., Коротков А.Н. Применение гидрогелей наноцеллюлозы при формировании бумаги и картона из различных видов волокнистого сырья // Вестн. МГУЛ – Лесной вестн. 2012. № 8. С. 110–116.

Vosko-boynikov I.V., Kondratyuk V.A., Nikolskiy S.N., Konstantinova S.A., Korotkov A.N. Application of Nanocellulose Hydrogels in the Formation of Paper, and Cardboard from Different Types of Fibrous Raw Materials. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2012, no. 8, pp. 110–116. (In Russ.).

2. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Ситникова А.Е., Бычин Н.В., Гладышева Е.К., Шавыркина Н.А., Миронова Г.Ф., Севастьянова Ю.В. Композиционная бумага из бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы // Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11, № 3. С. 460–471.

Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Sitnikova A.E., Bychin N.V., Gladysheva E.K., Shavyrkina N.A., Mironova G.F., Sevastyanova Yu.V. Bacterial Nanocellulose and Softwood Pulp for Composite Paper. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya ximiya i biotekhnologiya. = Proceedings of Universities Applied Chemistry and Biotechnology*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 460–471. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-460-471>

3. Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С., Кочетков В.А. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // Лесн. вестн. / *Forestry Bulletin*. 2019. Т. 23, № 5. С. 116–125.

Zarubina A.N., Ivankin A.N., Kuleznev A.S., Kochetkov V.A. Cellulose and Nanocellulose. Review. *Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 116–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-116-125>

4. Иоелович М.Я. Оптимизация процесса получения нанокристаллической целлюлозы и композитов на ее основе // Химия растит. сырья. 2021. № 1. С. 55–61.

Ioelovich M.Ya. Optimization of Process for Production of Nanocrystalline Cellulose and Its Composites. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*, 2021, no. 1, pp. 55–61 (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021018667>

5. Кузнецова Т.Г., Селиванова Е.Б., Богданова А.В., Иванкин А.Н. Наноидентификация нанообъектов в составе сырья и продуктов пищевого назначения // Экол. системы и приборы. 2012. № 2. С. 18–22.

Kuznetsova T.G., Selivanova E.B., Bogdanova A.V., Ivankin A.N. Nanoidentification Nanocomposite in Raw Materials and Food Products. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*, 2012, no. 2, pp. 18–22. (In Russ.).

6. Прошина О.П., Олиференко Г.Л., Евдокимов Ю.М., Иванкин А.Н. Наноцеллюлоза и получение бумаги на ее основе // Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе: тез. докл. Междунар. конф., Москва, 15–17 нояб. 2011 г., М.: МГУЛ, 2011. С. 24–28.

Proshina O.P., Oliferenko G.L., Evdokimov Yu.M., Ivankin A.N. Nano-Cellulose and Reception of a Paper on Its Basis. *Nanotechnologies and Nanomaterials in the Forest Complex: Proceedings of the International Conference, Moscow, 15–17 November 2011. Moscow, BMSTU Publ.*, 2011, pp. 24–28. (In Russ.).



7. Семкина Л.И., Сарана Н.В., Лепешкина Е.В., Товстошкuroв Е.М., Горячев Н.Л., Тюрин Е.Т., Зуйков А.А., Константинова С.А., Новиков А.А. Применение нанофибриллярной целлюлозы в композиции бумаги для гофрирования // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 2. С. 119–126.

Semkina L.I., Sarana N.V., Lepeshkina E.V., Tovstoshkurov E.M., Goraychev N.L., Tyurin E.T., Zuikov A.A., Konstantinova S.A., Novikov A.A. Nanofibrillated Cellulose in Corrugating Paper Composition. *Lesnoj vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 119–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-2-119-126>

8. Топтунов Е.А., Севастьянова Ю.В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // Химия растит. сырья. 2021. № 4. С. 31–45.

Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V. Powdered Cellulosic Materials: Overview, Classification, Characteristics and Fields of Application. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Material, 2021, no. 4, pp. 31–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049186>

9. Тюрин Е.Т., Зуйков А.А., Бондарев А.И., Гульянц Е.П., Фадеева Л.А., Константинова С.А., Новиков А.А., Аникушин Б.М., Винокуров В.А. Проведение испытаний экспериментальных образцов нанофибриллярной целлюлозы в производстве легкомелованной бумаги // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 2. С. 90–98.

Tyurin E.T., Zuikov A.A., Bondarev A.I., Gulyanz L.P., Fadeeva L.A., Konstantinova S.A., Novikov A.A., Anikuchin B.M., Vinokurov V.A. Testing of Experimental Samples of Nanofibrillar Cellulose in the Production of Lightweight Coated Paper. *Lesnoj vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 90–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-90-98>

10. Abitbol T., Amit R., Yifeng C., Yuval N., Eldho A., Tal B.-S., Shaul L., Oded S. Nanocellulose, a Tiny Fiber with Huge Applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, vol. 39, pp. 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.01.002>

11. Bras J., Hassan M.L., Bruzesse C., Hassan E.A., El-Wakil N.A., Dufresne A. Mechanical, Barrier, and Biodegradability Properties of Bagasse Cellulose Whiskers Reinforced Natural Rubber Nanocomposites. *Industrial Crops and Products*, 2010, vol. 32, no. 3, pp. 627–633. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.07.018>

12. Camarero Espinosa S., Kuhnt T., Foster E.J., Weder C. Isolation of Thermally Stable Cellulose Nanocrystals by Phosphoric Acid Hydrolysis. *Biomacromolecules*, 2013, vol. 14, no. 4, pp. 1223–1230. <https://doi.org/10.1021/bm400219u>

13. Grinshpan D.D., Gonchar A.N., Savitskaya T.A., Tsygankova N.G., Makarevich S.E. Rheological Properties of Cellulose-Chitosan-Phosphoric Acid Systems in Different Phase States. *Polymer Science, Series A*, 2014, vol. 56, no. 2, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1134/S0965545X14020059>

14. Hayase G., Kanamori K., Hasegawa G., Maeno A., Kaji H., Nakanishi K. A Superamphiphobic Macroporous Silicone Monolith with Marshmallow-Like Flexibility. *Angewandte Chemie*, 2013, vol. 52, no. 41, pp. 10788–10791. <https://doi.org/10.1002/anie.201304169>

15. Jorfi M., Foster J.E. Recent Advances in Nanocellulose for Biomedical Applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, no. 14, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1002/app.41719>

16. Lin N., Dufresne A. Nanocellulose in Biomedicine: Current Status and Future Prospect. *European Polymer Journal*, 2014, vol. 59, pp. 302–325. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.07.025>

17. Liu K., Tian Y., Jiang L. Bio-Inspired Superoleophobic and Smart Materials: Design, Fabrication, and Application. *Progress in Materials Science*, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 503–564. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.11.001>

18. Moon R.J., Martini A., Nairn J., Simonsen J., Youngblood J. Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 2011, vol. 40, no. 7, pp. 3941–3994. <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>
19. Revol J.F., Bradford H., Giasson J., Marchessault R.H., Gray D.G. Helicoidal Self-Ordering of Cellulose Microfibrils in Aqueous Suspension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1992, vol. 14, no. 3, pp. 170–172. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(05\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(05)80008-X)
20. Robles E., Urruzola I., Labidi J., Serrano L. Surface-Modified Nano-Cellulose as Reinforcement in Poly (Lactic Acid) to Conform New Composites. *Industrial Crops and Products*, 2015, vol. 71, pp. 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.075>
21. Si Y., Guo Z. Superhydrophobic Nanocoatings: From Materials to Fabrications and to Applications. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, no. 14, pp. 5922–5946. <https://doi.org/10.1039/C4NR07554D>
22. Siqueira G., Bras J., Dufresne A. Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications. *Polymers*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 728–765. <https://doi.org/10.3390/polym2040728>
23. Wei H., Rodriguez K., Renneckar S., Vikesland P.J. Environmental Science and Engineering Applications of Nanocellulose-Based Nanocomposites. *Environmental Science. Nano*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 302–316. <https://doi.org/10.1039/C4EN00059E>

**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 676.017.439

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-173-184

## Исследование влияния температуры сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы

Д.А. Прохоров<sup>✉</sup>, инж. Voith Paper, аспирант;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-4119>

В.К. Дубовый, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; daniel.prokhorov@gmail.com<sup>✉</sup>, dubovy2004@mail.ru


Поступила в редакцию 20.06.22 / Одобрена после рецензирования 18.09.22 / Принята к печати 23.09.22

**Аннотация.** В Российской Федерации на большинстве бумажных фабрик наблюдается значительный перерасход энергии, по разным оценкам – до 40 %, обусловленный низким уровнем технического, научного и кадрового обеспечения. При этом осуществляется выпуск продукции с неконкурентоспособными потребительскими свойствами. Таким образом, оптимизация конструкций и применяемых технологий, включая температурные режимы сушки, является актуальной задачей. Сушильная часть бумагоделательной машины – ее самая энергоемкая часть, при этом оказывает значительное влияние на показатели механической прочности и другие свойства бумаги, в том числе структурно-размерные. На сушку бумажного полотна затрачивается 72–77 % от общего количества расходуемой машиной энергии. Цель работы – анализ влияния температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства бумаги, с возможностью применения полученных закономерностей на действующих предприятиях отрасли, а также для дальнейших научных исследований. Приведены результаты изучения влияния вида целлюлозы, степени помола, массы 1 м<sup>2</sup> и температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства лабораторных образцов бумаги. В ходе исследования изготовлены и испытаны лабораторные отливки массой от 60 до 120 г/м<sup>2</sup> из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы, размолотой до степени помола от 20 до 50 °ШР. Температуру сушки материала варьировали от 80 до 140 °С. В результате анализа полученных образцов бумаги выявлено значительное влияние температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства бумаги. Увеличение температуры сушки с 80 до 140 °С оказывает наибольшее влияние на структурно-размерные свойства бумаги, изготовленной из массы большей степени помола, и на прочностные свойства бумаги, изготовленной из массы меньшей степени помола, при использовании в качестве сырья как хвойной, так и лиственной сульфатной беленой целлюлозы.

**Ключевые слова:** бумагоделательная машина, сушильная часть бумагоделательной машины, температура сушки бумажного полотна, производительность бумагоделательной машины, бумажное полотно, разрушающее усилие, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию, толщина, воздухопроницаемость

**Для цитирования:** Прохоров Д.А., Дубовый В.К. Исследование влияния температуры сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С.173–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-173-184>

© Прохоров Д.А., Дубовый В.К., 2023

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

Original article

## Influence of Drying Temperature on Paper Properties Made of Sulfate-Bleached Softwood and Hardwood Pulps

**Daniil A. Prokhorov**<sup>✉</sup>, Application Engineer of Voith Paper, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-4119>

**Vladimir K. Dubovy**, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; daniel.prokhorov@gmail.com<sup>✉</sup>, dubovy2004@mail.ru

Received on June 20, 2022 / Approved after reviewing on September 18, 2022 / Accepted on September 23, 2022

**Abstract.** Most paper mills in the Russian Federation consume around 40 % more electrical power than they actually require. The reasons are a low level of technical, scientific, and proficient assistance. Moreover, the produced goods have non-competitive consumption characteristics. The urgent current measures in this matter contain constructional and technological optimization, including drying temperature modes. The drying section of a paper machine is the most energy-consuming, while it significantly affects the mechanical strength and supplementary properties of the resulting paper goods with their structural and dimensional characteristics. Drying the paper web takes 72–77 % of the total energy of the paper machine. Therefore, the purpose of this study is to analyze the influence of the temperatures of the drying process on the strength and structural-dimensional properties of the paper, with the perspective for further application of the results in the practice of industrial companies and additional scientific investigation. The presented results show the influence of pulp type, beating degree, mass of 1 m<sup>2</sup>, and drying temperature on the strength and structural-dimensional properties of laboratory samples. Within the investigational process, laboratory samples from sulphate-bleached softwood and hardwood pulp were created and tested. The weights of the samples varied from 60 to 120 g/m<sup>2</sup>, and the beating degrees ranged from 20 to 50 °SR. The drying temperature extended from 80 to 140 °C. The analysis of the acquired paper samples revealed that the drying temperatures had a considerable impact on the strength, structure, and dimensional qualities of the material. Namely, while sulfate-bleached softwood and hardwood pulp types were used as a raw material, increasing the drying temperature from 80 to 140 °C had the greatest effect on the structural-dimensional properties of the paper made from a pulp with a higher beating degree and the greatest effect on the strength properties of the paper made from a pulp with a lower beating degree.

**Keywords:** paper machine, drying section of paper machine, drying temperature of paper web, paper machine productivity, paper web, tensile strength, burst strength, tear strength, thickness, air permeability

**For citation:** Prokhorov D.A., Dubovy V.K. Influence of Drying Temperature on Paper Properties Made of Sulfate-Bleached Softwood and Hardwood Pulps. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 173–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-173-184>



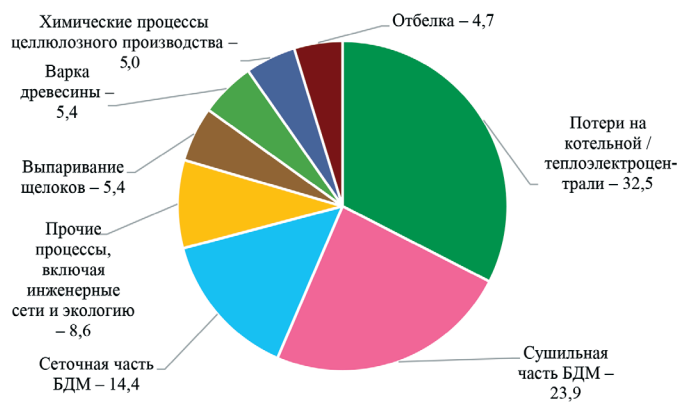
## Введение

Динамично развивающаяся целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) является одной из ведущих отраслей лесного комплекса и неразрывно связана с рядом сложных технологических, экономических, экологических и социальных аспектов [3, 4]. Производство бумаги и картона постоянно наращивается во всем мире и, согласно последним данным Стратегии развития лесного комплекса РФ, к 2030 г. достигнет 572 млн т. Повышение долгосрочной конкурентоспособности предприятий ЦБП в целом и предприятий отечественной ЦБП в частности является комплексной задачей, успех решения которой определяется рациональным использованием энергии, а также выпуском высококачественной продукции. Энергоэффективность и производительность в настоящее время находятся в фокусе внимания современных предприятий.

Анализ производственных процессов и оборудования с наибольшим энергопотреблением позволяет сделать технологически обоснованные предположения о потенциальных возможностях энергосбережения (рис. 1, 2). Так, согласно исследованиям [16], 24 % текущих возможностей экономии энергии в производственном цикле предприятий ЦБП сосредоточены в модернизации конструкции, технологического процесса и правильной настройке оборудования и сопутствующих систем сушильной части бумагоделательной машины (БДМ).

Рис. 1. Текущие возможности экономии энергии при внедрении наилучших достижений технологий для модернизации предприятий ЦБП [16], % (всего – 491 пДж)

Fig. 1. Current opportunities for energy savings in the implementation of BAT for the upgrade of pulp and paper enterprises [16], % (total – 491 PJ)



Для БДМ сушильная часть является наиболее энергоемкой: на сушку бумаги затрачивается 72...77 % от общего количества расходуемой машинной энергии, при этом удаляется менее 2 % влаги из бумажного полотна [1, 5]. В то же время в процессе сушки осуществляется не только окончательное обезвоживание полотна путем испарения из него влаги, но и протекают процессы, определяющие качество готовой продукции [9, 11, 17–20]. По мере удаления воды из влажного полотна происходит дальнейшее сближение волокон за счет сил поверхностного натяжения полотна с образованием межволоконных связей, от количества которых зависит плотность и прочность материала [6, 8].

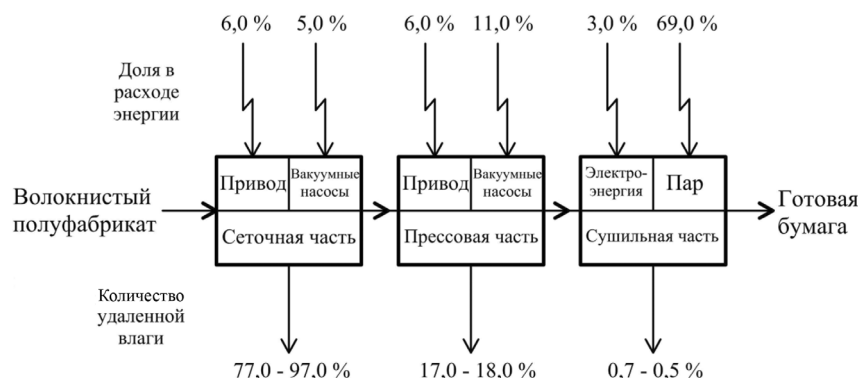


Рис. 2. Распределение расхода энергии современной БДМ и соотношение удаленной влаги [1, 2]

Fig. 2. Distribution of energy consumption of a modern paper machine and evaporated moisture ratio [1, 2]

Таким образом, оптимизация температур сушки, используемых на предприятиях отрасли, целесообразна. При этом есть потребность в исследованиях, посвященных изучению влияния температуры сушки на потребительские свойства бумаги [1, 9, 15].

Цель – исследование влияния температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства бумаги из сульфатной блененной хвойной и лиственной целлюлозы.

Достижение поставленной цели обеспечивалось решением следующих задач:

1. изучить влияние температуры сушки лабораторных образцов сульфатной блененной целлюлозы на прочностные и структурно-размерные свойства;
2. оценить возможность повышения температуры сушки лабораторных образцов сульфатной блененной целлюлозы с точки зрения ее влияния на прочностные и структурно-размерные свойства;
3. установить оптимальную температуру сушки в зависимости от вида целлюлозы, степени помола и массы 1 м<sup>2</sup>.

#### *Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования были использованы 2 вида волокна сульфатной блененной товарной целлюлозы в листах: хвойная (Mercer Rosenthal GmbH, Германия) и лиственная (The Navigator Company, Португалия). Характеристики изученной целлюлозы сведены в таблицу. Сульфатная целлюлоза была выбрана в связи с наибольшей распространенностью данного метода варки на сегодняшний день. Волокна сульфатной целлюлозы при всех прочих равных условиях придают бумаге, как правило, более высокие показатели механической прочности [7, 12–14].

Определение фракционного состава волокна выполнено с использованием анализатора волокна Lorentzen & Wettre Fibertester в соответствии со стандартом ISO 16065-2 [10, 16].



**Характеристики использованной беленой целлюлозы****Properties of the sulfate-bleached pulp**

Целлюлоза	Длина волокна, мм	Ширина волокна, мкм
Лиственная	0,753	26,1
Хвойная	2,131	38,8

Исследования произведены в лабораторных условиях. Для определения влияния температуры на волокна не использованы наполнители или химические добавки. Выбранные значения массы 1 м<sup>2</sup> (60, 80, 100, 120 г/м<sup>2</sup>), степени помола, а также температур сушки соответствуют наиболее распространенным при производстве различных видов бумаг и картона в реальных условиях на предприятиях бумажной промышленности.

В начале эксперимента предварительно подготовленная целлюлоза в количестве 450 г. а.с.в. была замочена в воде на 4 ч, далее дезинтегрирована в течение 10 мин с последующим размолотом до заданной степени помола – 20, 30, 40, 50 °ШР на лабораторном коническом рафинере фирмы Andritz (мощность двигателя – 2,24...8 кВт, частота вращения 700–2500 об./мин, полезная мощность размолота – 0,5...2 кВт, характеристики гарнитуры: CrNi-сталь, угол конусности – 60 °, ширина ножей – 6 мм).

Отобранная из рафинера масса была взвешена и распределена по гомогенизаторам, с добавлением воды до достижения концентрации в гомогенизаторе 0,44...0,50 %. После проверки степени помола на аппарате Шоппер-Риглера, произведено формование образцов бумаги на листоотливном аппарате Рапид-Кетен. Сформованные листы бумаги высушены на сушильной горке при заданных температурах – 80, 100, 120, 140 °С. В процессе проведения исследования контролировали и регулировали температуру греющей поверхности.

Неразрушающими методами определены структурно-размерные свойства полученных образцов бумаги. Для этого использовали лабораторные весы, толщиномер, прибор для определения воздухопроницаемости фирмы Lorentzen & Wettre. Воздухопроницаемость установлена методом Герлея (по стандарту ISO 5636-5).

Прочностные свойства полученных образцов определены при помощи приборов Lorentzen & Wettre: горизонтальной разрывной машины (по стандарту ISO 1924-2), устройства для определения сопротивления продавливанию (по стандарту ISO 2758) и прибора Эльмендорфа для определения сопротивления раздиранию бумаги (по стандарту ISO 1974).

*Результаты исследования и их обсуждение*

В результате проведения исследования получено более 500 образцов бумаги из беленой хвойной и лиственной целлюлозы, имеющих заданную степень помола, заданную массу 1 м<sup>2</sup> и высушенных при заданных температурах. Сле-

лено более 10 000 измерений прочностных и структурно-размерных свойств образцов бумаги. Выявлено влияние вида волокна, степени помола, массы 1 м<sup>2</sup> и температуры сушки на свойства бумаги.

У образцов бумаги, изготовленных из хвойной беленой целлюлозы, увеличение степени помола сопровождается ростом разрушающего усилия, сопротивления продавливанию, снижением воздухопроницаемости, а также после 30 °ШР отмечено уменьшение сопротивления раздиранию и толщины вне зависимости от массы 1 м<sup>2</sup> образцов и температуры сушки. При повышении степени помола с 20 до 50 °ШР наблюдали рост разрушающего усилия на 46 %, сопротивления продавливанию на 32 %, воздухопроницаемости в 11 раз, при повышении степени помола с 30 до 50 °ШР – снижение сопротивления раздиранию на 28 % и толщины на 9 % (здесь и далее указаны средние значения показателей свойств бумаги по всем измерениям при постоянной температуре сушки и массе 1 м<sup>2</sup>). Наибольшие рост разрушающего усилия (17 %) и сопротивления продавливанию (19 %), снижение сопротивления раздиранию (16 %) и толщины (13 %) выявлены при увеличении степени помола с 30 до 40 °ШР. Наибольшее уменьшение воздухопроницаемости (290 %), наименьшие рост сопротивления продавливанию (5 %) и снижение сопротивления раздиранию (14 %) – при увеличении степени помола с 40 до 50 °ШР. Наименьшие рост разрушающего усилия (9 %) и уменьшение воздухопроницаемости (49 %) – при увеличении степени помола от 20 до 30 °ШР. С повышением степени помола воздух хуже проходит через структуру бумаги, т. е. снижается ее проницаемость и увеличивается время прохождения воздуха через структуру бумаги.

Исследование образцов бумаги из хвойной беленой целлюлозы показало, что увеличение температуры сушки сопровождается снижением разрушающего усилия (рис. 3), сопротивления продавливанию (рис. 4), сопротивления раздиранию (рис. 5), а также ростом толщины (рис. 6) и воздухопроницаемости (рис. 7) вне зависимости от степени помола целлюлозы и массы 1 м<sup>2</sup> образцов. При повышении температуры сушки с 80 до 140 °С отмечены снижение разрушающего усилия на 13 %, сопротивления продавливанию на 10 %, сопротивления раздиранию на 11 %, рост толщины на 9 % и воздухопроницаемости на 35 % (здесь и далее указаны средние значения показателей свойств бумаги по всем измерениям при постоянной степени помола и массе 1 м<sup>2</sup>). Наибольшее снижение разрушающего усилия (5 %), сопротивления продавливанию (4 %), сопротивления раздиранию (5 %), а также наибольший рост толщины (4 %) и воздухопроницаемости (23 %) установлены при увеличении температуры сушки от 80 до 100 °С. С ростом температуры сушки от 120 до 140 °С наблюдаются снижение разрушающего усилия на 4 %, сопротивления продавливанию на 1,5 %, сопротивления раздиранию на 3,5 %, увеличение воздухопроницаемости на 4,5 %, на толщине данное повышение температуры практически не отражается. С ростом температуры сушки воздух лучше проходит через структуру бумаги, т. е. увеличивается ее проницаемость и уменьшается время прохождения воздуха через структуру бумаги.

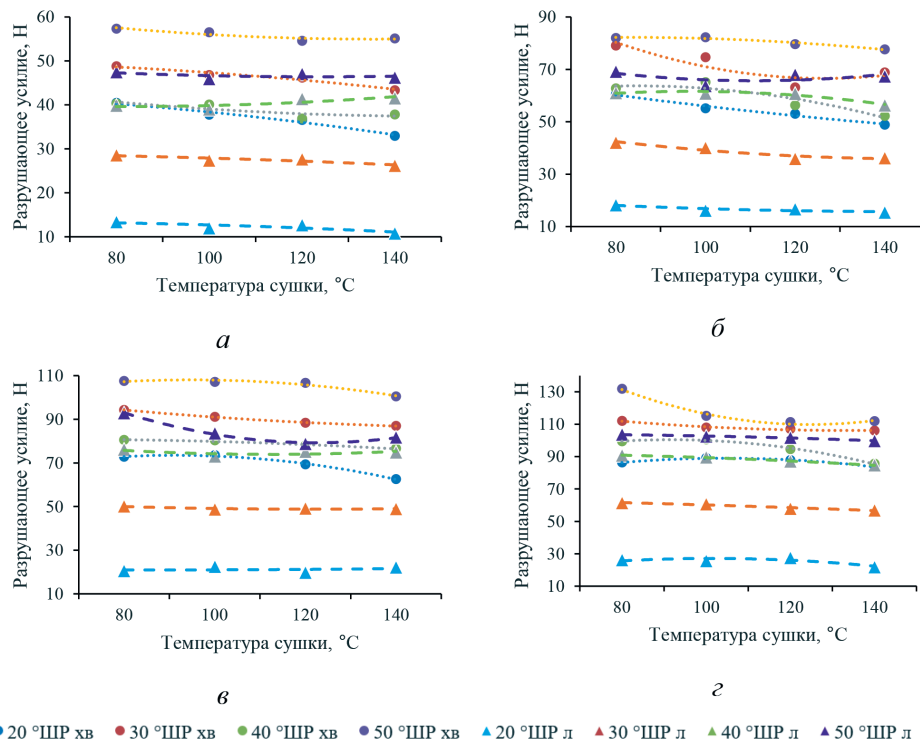


Рис. 3. Зависимость разрушающего усилия образцов бумаги из белой хвойной (хв) и лиственной (л) целлюлозы разной массы 1 м<sup>2</sup> от температуры сушки: а – 60 г/м<sup>2</sup>; б – 80 г/м<sup>2</sup>; в – 100 г/м<sup>2</sup>; г – 120 г/м<sup>2</sup> (обозначения в легенде соответствуют обозначениям на рис. 4–7)

Fig. 3. Dependence of tensile strength of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of 1 m<sup>2</sup> on drying temperatures: а – 60 g/m<sup>2</sup>; б – 80 g/m<sup>2</sup>; в – 100 g/m<sup>2</sup>; г – 120 g/m<sup>2</sup> (the notations in the legend correspond to ones in fig. 4–7)

Увеличение степени помола образцов бумаги, изготовленных из лиственной белой целлюлозы, обуславливает повышение разрушающего усилия, сопротивления продавливанию, сопротивления раздиранию, снижение воздухопроницаемости и толщины независимо от массы 1 м<sup>2</sup> образцов и температуры сушки. При повышении степени помола с 20 до 50 °ШР наблюдаются рост разрушающего усилия на 300 %, сопротивления продавливанию на 382 %, сопротивления раздиранию на 164 %, снижение воздухопроницаемости и толщины независимо от массы 1 м<sup>2</sup> образцов и температуры сушки. При повышении степени помола с 20 до 30 °ШР наблюдаются рост разрушающего усилия на 132 %, сопротивления продавливанию на 150 %, сопротивления раздиранию на 98 %, а также наименьшее снижение воздухопроницаемости (62 %) происходят при увеличении степени помола с 20 до 30 °ШР. Наибольшее снижение воздухопроницаемости (430 %) и толщины (18 %) – при увеличении степени помола с 30 до 40 °ШР. Наименьшие рост разрушающего усилия (14 %), сопротивления продавливанию (15 %), сопротивления раздиранию (3 %) и снижение толщины (9 %) отмечены при увеличении степени помола от 40 до 50 °ШР.

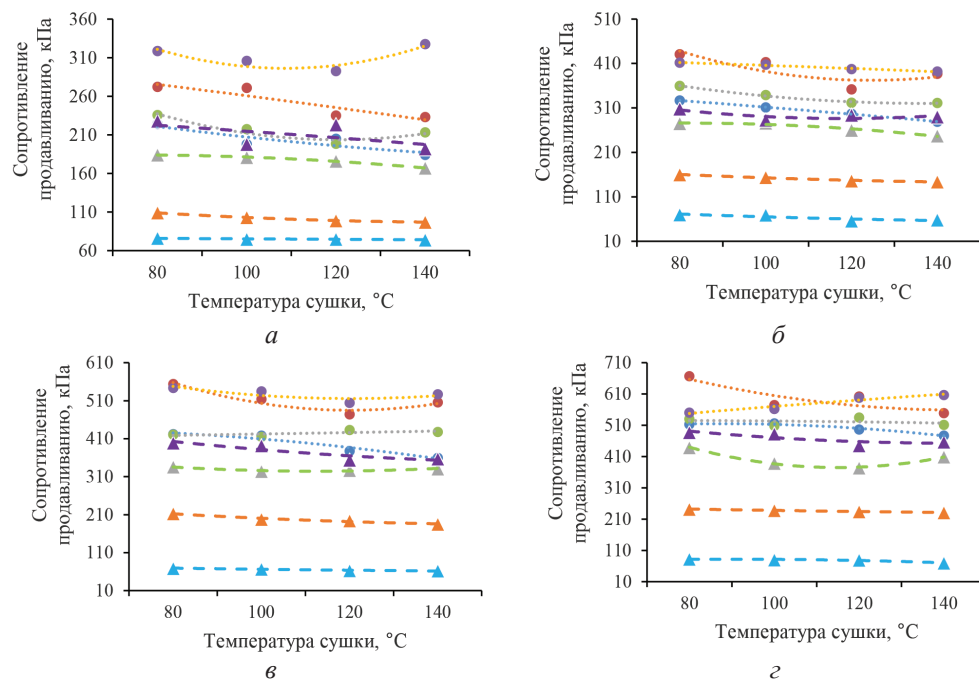


Рис. 4. Зависимость сопротивления продавливанию образцов бумаги из белой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы  $1 \text{ м}^2$  от температуры сушки: *а* – 60 г/м<sup>2</sup>; *б* – 80 г/м<sup>2</sup>; *в* – 100 г/м<sup>2</sup>; *г* – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 4. Dependence of burst strength of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of  $1 \text{ m}^2$  on drying temperatures: *a* – 60 g/m<sup>2</sup>; *б* – 80 g/m<sup>2</sup>; *в* – 100 g/m<sup>2</sup>; *г* – 120 g/m<sup>2</sup>

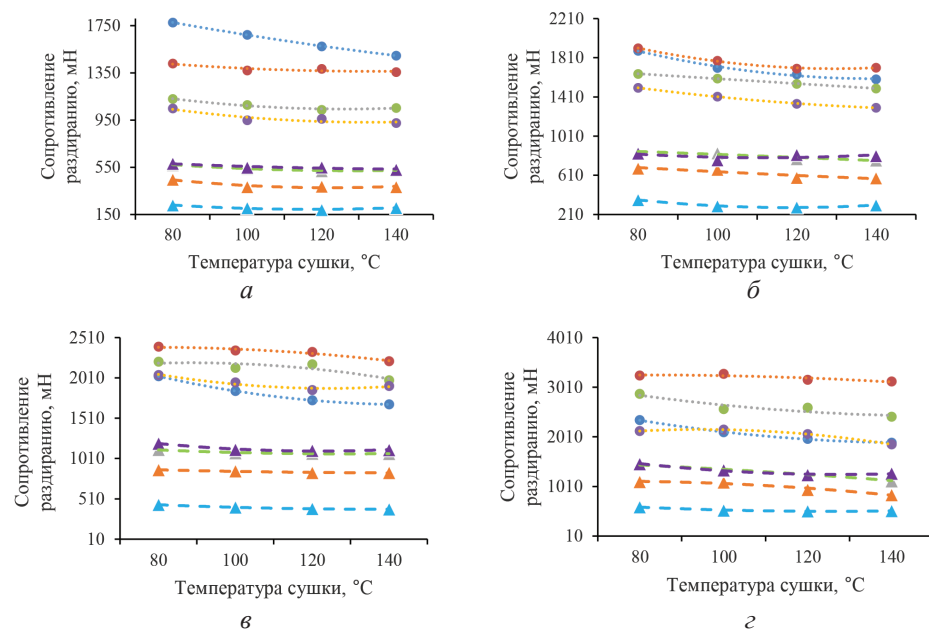


Рис. 5. Зависимость сопротивления раздиранию образцов бумаги из белой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы  $1 \text{ м}^2$  от температуры сушки: *а* – 60 г/м<sup>2</sup>; *б* – 80 г/м<sup>2</sup>; *в* – 100 г/м<sup>2</sup>; *г* – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 5. Dependence of tear strength of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of  $1 \text{ m}^2$  on drying temperatures: *a* – 60 g/m<sup>2</sup>; *б* – 80 g/m<sup>2</sup>; *в* – 100 g/m<sup>2</sup>; *г* – 120 g/m<sup>2</sup>

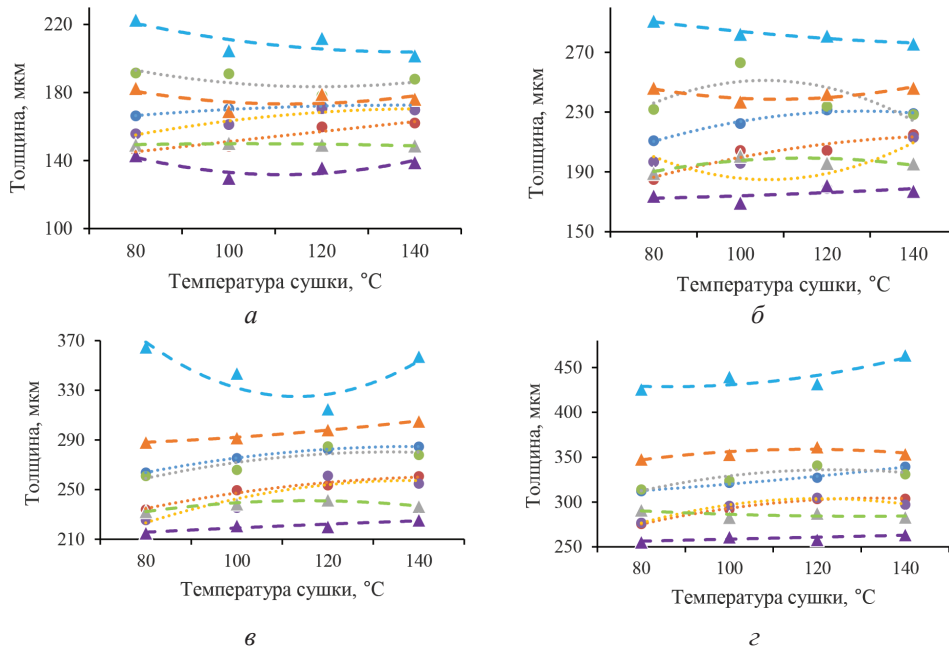


Рис. 6. Зависимость толщины образцов бумаги из беленой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы 1 м<sup>2</sup> от температуры сушки: а – 60 г/м<sup>2</sup>; б – 80 г/м<sup>2</sup>; в – 100 г/м<sup>2</sup>; з – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 6. Dependence of thickness of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of 1 m<sup>2</sup> on drying temperatures: а – 60 g/m<sup>2</sup>; б – 80 g/m<sup>2</sup>; в – 100 g/m<sup>2</sup>; з – 120 g/m<sup>2</sup>

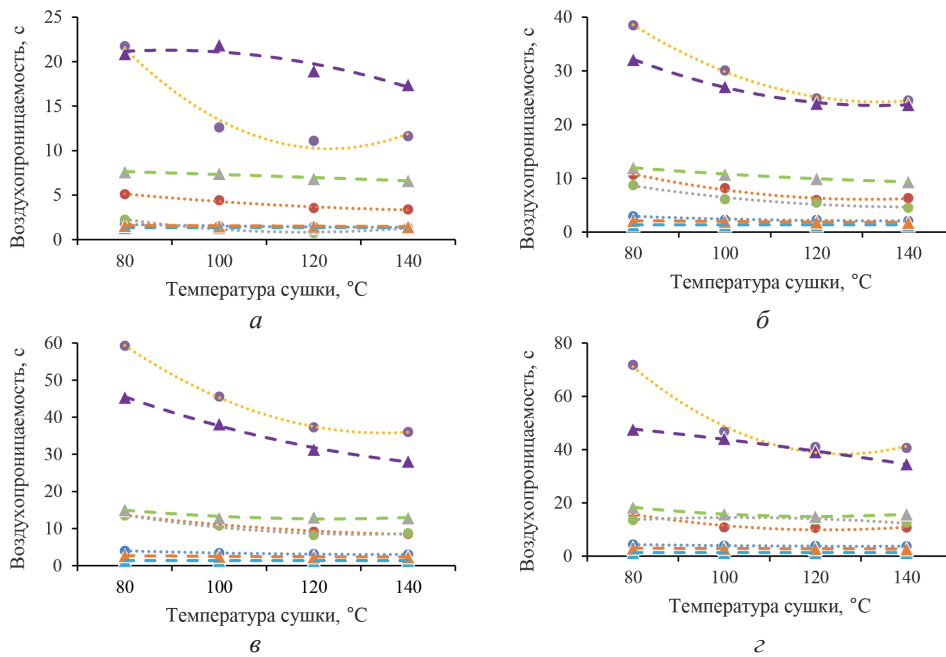


Рис. 7. Зависимость воздухопроницаемости образцов бумаги из беленой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы 1 м<sup>2</sup> от температуры сушки: а – 60 г/м<sup>2</sup>; б – 80 г/м<sup>2</sup>; в – 100 г/м<sup>2</sup>; з – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 7. Dependence of air permeability of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of 1 m<sup>2</sup> on drying temperatures: а – 60 g/m<sup>2</sup>; б – 80 g/m<sup>2</sup>; в – 100 g/m<sup>2</sup>; з – 120 g/m<sup>2</sup>

Увеличение температуры сушки для образцов из лиственной беленой целлюлозы приводит к снижению разрушающего усилия (рис. 3), сопротивления продавливанию (рис. 4), сопротивления раздиранию (рис. 5), а также к росту толщины (рис. 6) и воздухопроницаемости (рис. 7) при всех заданных степенях помола целлюлозы и значениях массы 1 м<sup>2</sup> образцов. При повышении температуры сушки с 80 до 140 °С наблюдаются снижение разрушающего усилия на 7 %, сопротивления продавливанию на 10 %, сопротивления раздиранию на 11 % и рост воздухопроницаемости на 14 %. Наибольшее снижение разрушающего усилия (4 %), сопротивления продавливанию (4 %), сопротивления раздиранию (7 %), увеличение воздухопроницаемости (7 %) происходят при повышении температуры сушки с 80 до 100 °С. Рост температуры сушки с 120 до 140 °С практически не сказывается на механических свойствах: изменение составляет 1...3 %.

### Выводы

Анализ полученных данных о структурно-размерных и прочностных свойствах образцов бумаги позволил сделать следующие выводы.

1. Установлены закономерности, описывающие изменение структурно-размерных и прочностных свойств образцов бумаги из беленой сульфатной целлюлозы при увеличении температуры сушки с 80 до 140 °С. Подтверждено, что ключевыми факторами, определяющими степень изменения характеристик, являются степень помола и порода древесины.

2. Повышение температуры сушки с 80 до 140 °С приводит к росту интенсивности испарения воды из бумаги и, как следствие, разрыхлению структуры, что обуславливает увеличение воздухопроницаемости до 35 % и снижение прочностных показателей. Потеря прочности при этом может достигать до 15 % в зависимости от массы 1 м<sup>2</sup> и степени помола.

3. В диапазонах изменения температуры сушки 80...120 и 120...140 °С снижение качественных показателей происходит в большей степени при повышении температуры до 120 °С, в дальнейшем снижение сопротивления продавливанию, сопротивления раздиранию, разрушающего усилия минимально.

4. В процессе производства бумаги из беленой сульфатной целлюлозы при сокращении продолжительности сушки путем повышения ее температуры до 140 °С следует учитывать, что в этом случае произойдет потеря прочности бумаги, причем потеря будет больше при низкой степени помола.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бойков Л.М. Повышение эффективности сушки путем модернизации пароконденсатных систем бумагоделательных, картоноделательных машин и гофроагрегатов. СПб.: СПбГУРП, 2015. 575 с.

Boykov L.M. *Improving the Drying Efficiency of Paper and Board Machines, and Corrugators*. Saint Petersburg, SPbSTUPP Publ., 2015. 575 p. (In Russ.).

2. Бойков Л.М., Прохоров Д.А., Ионин Е.Н. Повышение эффективности сушки на бумаго- и картоноделательных машинах // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015. № 2. С. 66–69.



Boykov L.M., Prokhorov D.A., Ionin E.N. Improving Drying Efficiency on Paper and Board Machines. *Cellyuloza. Bumaga. Karton*, 2015, no. 2, pp. 66–69. (In Russ.).

3. Камчатова Е.Ю., Перевозчикова А.К. Тенденции развития целлюлозно-бумажной промышленности Российской Федерации // Уч. зап. Рос. акад. предпринимательства. 2022. Т. 21, № 2. С. 43–49.

Kamchatova E.Yu., Perevozchikova A.K. Trends in the Development of Pulp and Paper Industry of the Russian Federation. *Ucheny`e zapiski Rossijskoj Akademii predprinimatel'stva*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2022-21-2-43-49>

4. Прохоров Д.А. Общая характеристика и перспективы развития мировой целлюлозно-бумажной промышленности // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения», Санкт-Петербург, 8 нояб. 2021 г. Т. II. СПб.: ВШТЭ СПбГУИТД, 2022. С. 69–75.

Prokhorov D.A. General Characteristic and Development Prospects of the World Pulp and Paper Industry. *Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Pulp and Paper Industry «Modern Pulp and Paper Industry. Actual Tasks and Promising Solutions»*, Saint Petersburg, 8 November 2021. Saint Petersburg, HSTE SPbSUITD Publ., 2022, pp. 69–75. (In Russ.).

5. Прохоров Д.А., Смолин А.С. Оценка эффективности сушильной части машин для выработки санитарно-гигиенических видов бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 159–168.

Prokhorov D.A., Smolin A.S. Performance Assessment of the Drying Section of Machines for the Production of Tissue Paper Grades. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 2, pp. 159–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-159-168>

6. Фляте Д.М. Свойства бумаги. 2-е изд., испр. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 648 с. Flyate D.M. *Paper Properties*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1976. 648 p. (In Russ.).

7. Antonsson S., Mäkela P., Fellers C., Lindström M. Comparison of the Physical Properties of Hardwood and Softwood Pulps. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2009, vol. 24, no. 4, pp. 409–414. <https://doi.org/10.3183/npprj-2009-24-04-p409-414>

8. Björk E. *Production and Application of Fine Fractions Made of Chemical Pulp for Enhances Paperboard Strength*. Thesis for Licentiate Degree in Chemical Engineering. Sweden, Sundsvall, 2020. 41 p.

9. Boykov L.M., Prokhorov D.A., Ionin E.N., Lukianov S.A. Modernization of Steam and Condensate Systems of Drying Plants of Paper and Cardboard-Making Machines. *Proceedings of the 102-th International Scientific-Practical Conference “The Technical Progress of Humanity in the Context of the Continued Expansion of the Material Needs of Society”*. London, 2015, pp. 40–42.

10. Defraeye T., Houvenaghel G., Carmeliet J., Derome D. Numerical Analysis of Convective Drying of Gypsum Boards. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 9-10, pp. 2590–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.001>

11. Ham C.-H., Youn H.J., Lee H.L. Influence of Fiber Composition and Drying Conditions on the Bending Stiffness of Paper. *Bioresources*, 2020, vol. 15, no. 4, pp. 9197–9211. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.9197-9211>

12. Johansson A. *Correlations Between Fibre Properties and Paper Properties*. Master Thesis in Pulp Technology. Sweden, KTH Publ., 2011. 49 p.

13. Karlsson H. *Some Aspects on Strength Properties in Paper Composed of Different Pulps*. Licentiate thesis. Sweden, Karlstad, 2007. 57 p.

14. Karlsson H., Rinnevu T. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry: A Handbook*. Sweden, Kista, AB Lorentzen & Wettre Publ., 2006. 120 p.
15. Meltzer F.P. *Technologie der Zellstoffmahlung*. Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften. Germany, Aachen, 1994. 148 p. (In German).
16. Miller T., Kramer C., Fisher A. *Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in US Pulp and Paper Manufacturing*. Washington, 2015. 108 p.
17. Mäkelä P. Effect of Drying Conditions on the Tensile Properties of Paper. In *Advances in Pulp and Paper Research. Proceedings of the 14th Fundamental Research Symposium, Oxford, 2009*. FRC, Manchester, 2018, pp. 1079–1094.
18. Poirier N., Pikulik I. The Effect of Drying Temperature on the Quality of Paper. *Drying Technology*, 1997, vol. 15, no. 6-8, pp. 1869–1879. <https://doi.org/10.1080/07373939708917333>
19. Wahlström T. *Influence of Shrinkage and Stretch During Drying on Paper Properties. Licentiate Thesis*. Sweden, Stockholm, 1999. 12 p.
20. Wahlström T. The Influence of Drying Time and Temperature Revisited. *Proceedings of the conference "Progress in Paper Physics", 2006*. Ed. by D.W. Coffin. USA, Miami University Oxford Publ., 2006, pp. 82–85.

**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



Original article

УДК 630\*332.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-185-194

## Problems of Forest Resource Management in the Arctic Zone of the Russian Federation

**Vasily F. Kovyazin<sup>1</sup>**, *Doctor of Biology, Prof.;*

ResearcherID: [AAD-5917-2020](https://orcid.org/0000-0002-3118-8515), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-8515>

**Olga Yu. Lepikhina<sup>1</sup>**, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [Q-4455-2017](https://orcid.org/0000-0003-1270-9730), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1270-9730>

**Polina M. Demidova<sup>1</sup>**, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAP-3828-2020](https://orcid.org/0000-0002-8488-512X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8488-512X>

**Olga A. Kolesnik<sup>1</sup>**, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAD-5718-2020](https://orcid.org/0000-0003-0423-2119), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0423-2119>

**Seyed O.R. Shobairi<sup>2,3</sup>**, *PhD in GIS and Remote Sensing;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6528-8653>

**An Truong Nguyen<sup>1</sup>**, *Postgraduate Student;* ResearcherID: [HGD-4706-2022](https://orcid.org/0000-0002-4881-7947),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-7947>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Mining University, 21st Line, 2, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation; [vfkedr@mail.ru](mailto:vfkedr@mail.ru), [Lepikhina\\_OYu@pers.spmi.ru](mailto:Lepikhina_OYu@pers.spmi.ru), [Demidova\\_PM@pers.spmi.ru](mailto:Demidova_PM@pers.spmi.ru), [Kolesnik\\_OA@pers.spmi.ru](mailto:Kolesnik_OA@pers.spmi.ru), [annguyenthebeatles1997@gmail.com](mailto:annguyenthebeatles1997@gmail.com)

<sup>2</sup>Central South University of Forestry and Technology, Shaoshan South Road, 498, Changsha, Hunan, 410004, P.R. China; [Omidshobeyri214@gmail.com](mailto:Omidshobeyri214@gmail.com)

<sup>3</sup>Nanjing Forestry University, Longpan Road, 159, Nanjing, Jiangsu, 210037, China

Received on June 13, 2021 / Approved after reviewing on September 17, 2021 / Accepted on September 24, 2021

**Abstract.** The study exposes the issues with managing land and forest resources in the Arctic region. Among them are the inability to estimate the cost of forest resources, the conversion of forestry lands into industrial lands, the consequences of renting forest lands, an insufficient forestry inventory, a small number of employees of the State Forest Protection Service, and underdeveloped infrastructure. The main statements of the Arctic Hectare Program are reviewed, which give the possibility of granting land plots primarily located in forest areas. The program is discussed in comparison with the analogous Far Eastern Hectare Program. The development of the Arctic Hectare Program is expected to preserve and increase the popularity of the Arctic region in the future. However, the efficient use of the land requires the improvement of transport infrastructure. The internet site, Geoportal, is used for an analysis of the primary disadvantages of geoinformation systems for selecting land plots in the Arkhangelsk region, which is a part of the Arctic zone of the Russian Federation. The website was established within the Arctic Hectare Program. The article provides suggestions for additional functions of the public cadastral map. It also reveals the reasons for the absence of a methodology for estimating forest resources, including Arctic tundra vegetation. Furthermore, the difficulties with the forest land delegation are observed in relation to the

implementation of investment projects in mining, fuel, and energy areas, the development of transportation infrastructure, and the formation of environmental protection zones. The cases of renting out forest lands are discussed.

**Keywords:** forest resources management, Arctic zone, Arctic Hectare Program, public cadastral map

**For citation:** Kovyazin V.F., Lepikhina O.Yu., Demidova P.M., Kolesnik O.A., Shobairi S.O.R., Nguyen A.T. Problems of Forest Resource Management in the Arctic Zone of the Russian Federation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 185–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-185-194>

Научная статья

### Проблемы управления лесными ресурсами в Арктической зоне Российской Федерации

**В.Ф. Ковязин**<sup>1</sup>✉, д-р биол. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAD-5917-2020](https://orcid.org/0000-0002-3118-8515),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-3118-8515>

**О.Ю. Лепихина**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [Q-4455-2017](https://orcid.org/0000-0003-1270-9730),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-1270-9730>

**П.М. Демидова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; *ResearcherID:* [AAP-3828-2020](https://orcid.org/0000-0002-8488-512X),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-8488-512X>

**О.А. Колесник**<sup>1</sup>, канд. техн. наук; *ResearcherID:* [AAD-5718-2020](https://orcid.org/0000-0003-0423-2119),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0423-2119>

**С.О.Р. Шобайри**<sup>2</sup>, канд. наук, эксперт по ГИСам;

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6528-8653>

**Ч.А. Нгуен**<sup>1</sup>, аспирант; *ResearcherID:* [HGD-4706-2022](https://orcid.org/0000-0002-4881-7947),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-4881-7947>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный институт, 21-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106; [vfkedr@mail.ru](mailto:vfkedr@mail.ru)✉, [Lepikhina\\_OYu@pers.spmi.ru](mailto:Lepikhina_OYu@pers.spmi.ru), [Demidova\\_PM@pers.spmi.ru](mailto:Demidova_PM@pers.spmi.ru), [Kolesnik\\_OA@pers.spmi.ru](mailto:Kolesnik_OA@pers.spmi.ru), [annguyenthebeatles1997@gmail.com](mailto:annguyenthebeatles1997@gmail.com)

<sup>2</sup>Центрально-южный университет лесного хозяйства и технологий, Шаошань Сауф Роуд, д. 498, г. Чанша, пров. Хунань, Китай, 410004; [Omidshobeyri214@gmail.com](mailto:Omidshobeyri214@gmail.com)

<sup>3</sup>Нанкинский университет лесного хозяйства, Лонгпан Роуд, д. 159, г. Нанкин, пров. Цзянсу, Китай, 210037

---

Поступила в редакцию 13.06.21 / Одобрена после рецензирования 17.09.21 / Принята к печати 24.09.21

---

**Аннотация.** Выявлены проблемы управления земельными и лесными ресурсами в Арктической зоне. К таким проблемам можно отнести невозможность стоимостной оценки лесных ресурсов, перевод земель лесного фонда в земли промышленного пользования, последствия аренды лесных участков, недостаточность проведения инвентаризации земель лесного фонда, небольшое количество работников лесной охраны, слаборазвитую инфраструктуру. Рассмотрены основные положения программы «Арктический гектар», предоставляющей возможность получения земельных участков, расположенных преимущественно на землях лесного фонда. Программа описана в сравнении с «Дальневосточным гектаром». Предполагается, что развитие программы «Арктический гектар» предотвратит отток населения из Арктической зоны и увеличит

количество проживающих на этой территории. Однако для эффективного использования земельных участков необходимо развитие транспортной инфраструктуры. На примере геопортала Архангельской области, входящей в Арктическую зону Российской Федерации, проанализированы основные недостатки геоинформационных систем для выбора земельных участков в рамках программы «Арктический гектар». Предложено использовать дополнительные возможности публичной кадастровой карты. Раскрыты причины отсутствия методологии оценки лесных ресурсов, в том числе тундровых лесов арктической зоны. Обсуждаются проблемы передачи лесных земель в связи с реализацией инвестиционных проектов горнодобывающего и топливно-энергетического комплексов, транспортного строительства, созданием природоохранных зон. Рассмотрены случаи сдачи лесных земель в аренду.

**Ключевые слова:** управление лесными ресурсами, организация лесопользования, Арктическая зона, Арктический гектар, программа «Арктический гектар», публичная кадастровая карта

**Для цитирования:** Ковязин В.Ф., Лепихина О.Ю., Демидова П.М., Колесник О.А., Шобайри С.О.Р., Нгуен Ч.А. Проблемы управления лесными ресурсами в Арктической зоне Российской Федерации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 185–194. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-185-194>

### *Introduction*

The value of land and forest supplies increases with the identification of problems related to the rational use of natural resources, the analysis of possibilities for territorial improvement, and climate change [12, 17, 18, 23, 25, 26, 28].

The land funds are reduced because of the conversion of agricultural land for industrial purposes, settlements, and road network growth. Swamping, physical, and chemical deterioration have resulted in the loss of vast areas of agricultural territories [11, 14, 20, 24]. However, it is possible to solve the problem by providing the population with land at the expense of the forest areas.

One of the most significant categories of natural resources is forests. As a part of biological resources, it is exhaustive but renewable. Forest resources are evaluated by the extent of the forest area, timber reserves, and forest cover.

The world's wood reserves are about 350 billion m<sup>3</sup>. Russia has the greatest timber supplies in the world, with 26 % of the total, where about half is the softwood type [3].

Two-thirds of the territory of the Russian Federation is covered by forests. The Arctic area of Russia includes the northern part of the Siberian taiga, the largest forest on Earth. The taiga originates in the Scandinavian countries and extends over 9000 kilometers through Russia to the Pacific coast. It is several times larger than the Amazon Forest and occupies almost 20 % of the world's forest area. The Siberian taiga is legitimately called the lungs of the entire planet.

On August 1, 2021 in accordance with Federal Law No. 119-FZ, a simplified procedure for granting land plots for free use started on some territories of the Arctic zone. The process was stimulated by the practice of the Far Eastern region [15].

The Arctic Hectare Program is based on the Far Eastern Hectare Program, which has been operating on the territory of our country since 2016. A piece of land is given for five years; afterwards, it can be registered in ownership or leased on a long-term basis. This allows to maintain and increase the population of the Arctic zone in



the future. However, these areas are not as attractive as those that are located on the southern borders of the country. The efficient use of the territories also requires the improvement of transport infrastructure.

### *Results and discussion*

*Problems of land management.* The Arctic Hectare Program excludes agricultural lands for reindeer breeding, nature protection areas, as well as the Forest Fund, cultural heritage sites, and coastal regions.

The results of the Far Eastern Hectare Program have shown that because of the distribution of land property, many segments of the economy have been developing, such as tourism, agriculture, the service market, and so on. However, they have also revealed the difficulties that may arise after acquiring a piece of land.

According to the legislation, the transferred plots must be under municipal or state ownership. If the plot's possession is not clearly defined, the local government must carry out a registration procedure. Another limitation is the land application categories, which are permitted by the law. The most attractive are plots for agricultural use, but they usually belong to communal property.

In the 1990s, radical changes took place in Russia related to the distribution of agricultural lands to workers on collective and state farms. As a result, citizens received land shares that didn't distinguish private ownership from communal property. In order to determine such plots according to the current official registration, it is required to provide a person with a part of land consistent with the land share.

Geoportal is used in the Arkhangelsk region to identify land plots suitable for the Arctic Hectare Program. It indicates the possible location of land plots [4] (fig. 1).

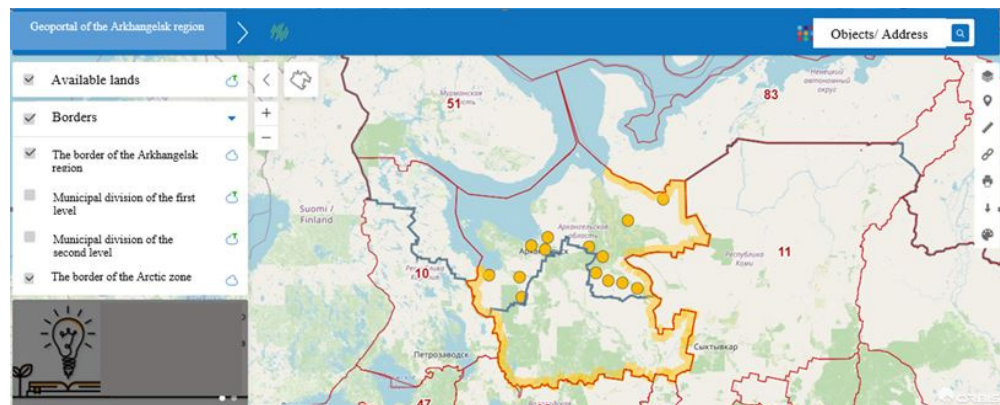


Fig. 1. Geoportal of the Arkhangelsk region

This website allows selecting land plots for further registration. Fig. 2 illustrates a list of possible locations in the Arkhangelsk region. Therefore, this online resource helps with the preliminary selection of a land plot. The usage of this site alone is undesirable because it does not contain enough information [2, 3, 11, 22, 23].

Let us choose as an example a land plot for potential registration with cadastral number 29:16:060201:43, information about which is available on the



Geoportal of the Arkhangelsk region (fig. 3). As can be demonstrated, this source does not contain enough information that should be considered when selecting a land plot. For example, it does not present limits on the use of the land plot that are significant. However, the public cadastral map [22] contains information about each area with special usage conditions, which are included in the Unified State Register of Real Estate.

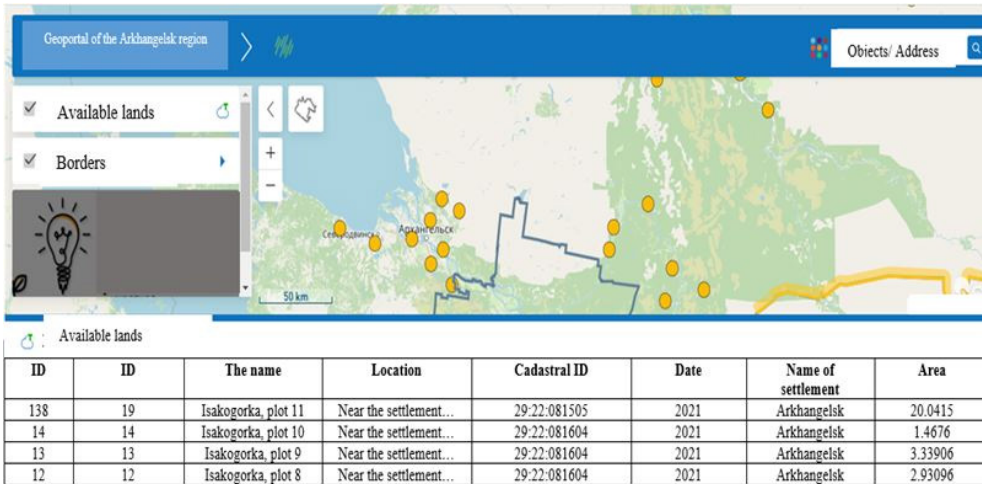


Fig. 2. Tabular representation of available land plots

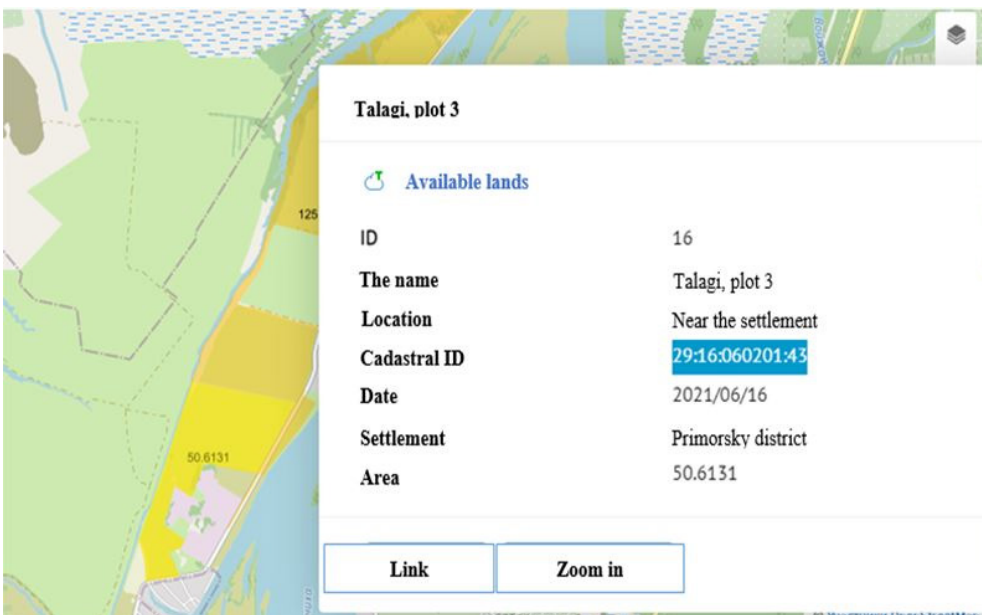


Fig. 3. Land plot selection

According to the information of the public cadastral map, the land plot with the cadastral number 29:16:060201:43 overlaps with the protected zone of the engineering communications (Protective Zone of Overhead Line-10 kV “09–06”), water protection zone, coastal protection belt (fig. 4).



Fig. 4. Graphical representation of a land plot with cadastral number 29:16:060201:43 on the public cadastral map

Therefore, using only one source of information is not enough. It is necessary to use additional resources for the selection of land plots (public cadastral map, Federal Spatial Data Fund [2]) [5, 6, 9, 10, 13, 14, 27].

*Problems of forest resource management.* However, it isn't correct to think simply about the worth of land resources while risking forest resources for the growth of the Arctic zone's economy. A peculiarity of the subjects of the Russian Federation located in the Arctic is the predominance (more than 95 %) of the Forest Fund lands over other categories of land. The role of forest cover in subarctic areas is extremely important. Tundra forests are an evolutionarily formed biome in areas of highly unstable contact between natural complexes of taiga and tundra. The lands allocated for the Arctic Hectare Program are adjacent to the lands of the Forest Fund. This can expose them to various dangers, including the emergence of fires on forest land, illegal logging, etc.

In addition to performing work on the provision of land in the Arctic zone, a free forest allocation project is in plans. If these two projects might be linked, there will be a demand for wood processing and construction, and as a result, one plot will be able to provide four or five jobs for several years, which will be very useful for the economy of the Arctic zone [7, 21].

*1. Impossibility of valuing forest resources.* Currently, there is no methodology in Russia for the monetary estimates of forest resources, including tundra forests. The forest range differs in species composition, age structure, and taxonomic specifications. As a result, regional forest management do not have sufficient data on the economic assessment of forest resources; they cannot consider their environmental role when

making management decisions. There is also no single methodology for calculating the cadastral value of forest lands.

The main function of the tundra forests is a protective one. Thus, all types of wood logging are prohibited there, except for sanitary and selective logging for the improvement of the growing stock. Therefore, it is impossible to estimate the tundra forests' resources and protective functions.

2. *Transformation forest lands to industrial lands.* Since mining is intensively carried out in the Arctic zone, oil and natural gas account for a larger share. When developing mineral deposits, there is often a need to transfer forest lands to other categories of land. In this case, the area of forests decreases and their protective function as the main regulator of the harsh northern climate decreases. The transfer is possible only in connection with the implementation of investment projects in mining and fuel and energy complexes, transport construction, and the creation of nature conservation areas.

3. *The consequences of renting forest plots.* Many geological studies of the subsurface are performed in the Arctic zone; mineral deposits are developed; linear facilities are built. Forest plots are leased for the performance of these works; companies are required to provide reforestation of the area after the development of the land [19].

4. *Lack of regular inventory of the Forest Fund.* Prior to the adoption of the Forest Code (2006), a forest inventory was regularly performed in the country once every 10 years. The collected data were used for the development of the forest register, statistical reporting, and documentation for various authorities. Since 2006, the budget financing of the Roslesinfor forest management organization has been cancelled, as the forest inventory. Instead of conducting field measurement, the old taxational data of the forest range were updated, with reduced indicators, which was especially important for lessees of the forest lands. Therefore, the taxational descriptions and flight maps should be considered unsuitable for forestry and forest land management. Due to changes to the Forest Code, annual forest inventories have been performed since January 1, 2022 [20].

It should also be noted that the use of satellite images and aviation (airplanes, helicopters and quadcopters) for the protection and inventory of forests is not possible due to low financing of the forestry [16].

5. *Insufficient number of forest protection workers in forestry leads to violations of forest legislation: unauthorized logging, the occurrence of forest grassroots and riding fires.* One of the declared tasks of the Conservation of Forests [1] federal project and the state program for the development of forestry in the country is an increase in the number of officials exercising forest supervision per 50 thousand hectares of forest lands. The growth rates of this indicator in the state program for the subjects of the Russian Federation differ dramatically, e.g., it will not change in the Arkhangelsk region and will increase by 3 times in the Yamalo-Nenets Autonomous District. In general, it is planned to increase it by 2 times in the Arctic zone [8].

6. *In addition, the infrastructure, especially the transport accessibility of forest areas, is poorly developed on the Forest Fund lands.* The absence of roads is one of the constraining factors for increasing the volume of harvesting of forest resources, namely, detection and extinguishing of fires, and conducting a ground forest land inventory.

### Conclusion

A significant part of the territory of the Russian Federation belongs to the Arctic zone, and 95 % is located in the Forest Fund. The management of forest resources in the Arctic zone is characterized by the same basic problems as for other forests in the Russian Federation. These are the impossibility of valuing forest resources, the risk of transferring Forest Fund lands to industrial lands, the consequences of renting forest plots, an insufficient inventory of Forest Fund lands, an insufficient number of forest protection workers in forestry, underdeveloped infrastructure. Also, considering the Arctic zone of the Russian Federation, it is necessary to understand that most of the lands provided under the Arctic Hectare Program are located near the lands of the Forest Fund. Therefore, when choosing a land plot, it is necessary to pay attention to possible problems not only with the land but also with forest resource management.

### REFERENCES

1. *Federal Project "Forest Conservation", Which is a Part of the National Project "Ecology"*. Official website of Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Available at: [https://www.mnr.gov.ru/activity/np\\_ecology/federalnyy-proekt-sokhranenie-lesov/](https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/federalnyy-proekt-sokhranenie-lesov/) (accessed 22.05.23).
2. *Federal Spatial Data Fund*. Official website of FSBI "Center for Geodesy, Cartography and SDI". Available at: <https://cgkipd.ru/fsdf/> (accessed 22.05.23).
3. Filipchuk A., Moiseev B., Medvedeva M., Kinigopulo P. Comparative Characteristics of Forests and Forest Management in Various States. *Forestry Information*, 2015, vol. 3, pp. 56–69. (In Russ.).
4. *Geoportal of the Arkhangelsk Region*. Official website. Available at: [https://maps29.ru/orbimap/public\\_map/geoportal29/arctic\\_g/](https://maps29.ru/orbimap/public_map/geoportal29/arctic_g/) (accessed 22.05.23).
5. Harlov I.Yu., Nikolaev A.I., Kulagin A.A. Accounting of Forest Resources and Organization of Their Use in the Federal Information System. *Izvestia of Orenburg State Agrarian University*, 2013, no. 5(43), pp. 8–10. (In Russ.).
6. Ivantsova E.A. Information Support of Forest Fund Lands for Their State Cadastral Registration. *Proceedings of Interexpo GEO-Siberi-2018, International Scientific Conference*. Novosibirsk, SSGA Publ., 2018, vol. 2, no. 3, pp. 173–182. (In Russ.).
7. Kanashin N.V. Experience of Modern Programs and Geographic Information Systems Application at Formation of Land Parcels for Constructing Linear Structures. *Geodezia i Kartografiya = Geodesy and Cartography*, 2019, vol. 80, no. 6, pp. 48–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-948-6-48-53>
8. Kharitonova G.N. State Management of Forests of the Arctic Zone of the Russian Federation: Environmental and Economic Efficiency. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. Transaction Kola Science Centre Publ., 2020, vol. 2, no. 11, pp. 154–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2307-5252.2020.2.8.017>
9. Kopylova N.S., Mustafin M.G., Mishina M.E. The Functionality Analysis of the Quantum Gis Geo-Information System as a Part of the Small-Scale Maps Creation. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 698, no. 4, art. no. 044016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/4/044016>
10. Kopylova N.S., Starikov I.P. Methods of Displaying Geospatial Information Using Cartographic Web Technologies for the Arctic Region and the Continental Shelf. *Geodezia i kartografiya = Geodesy and Cartography*, 2021, vol. 971, no. 5, pp. 15–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2021-971-5-15-22>



11. Kurlovich L., Kositsin V., Tsaregradskaya S. Current Improvement of Non-Wood Forest Resource Inventory and Assessment Procedures. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya: elektronnyy setevoj zhurnal*, 2019, no. 3, pp. 73–81. (In Russ.). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.06>
12. Masyuk N.N., Bushueva M.A., Bragina Z. The Institutional Regulatory Environment of the Digital Ecosystem: Theoretical Approach and Russian Experience. *SHS Web of Conferences*, 2020, vol. 73, art. no. 01019, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20207301019>
13. Masyuk N.N., Bushueva M.A., Vasyukova L.K., Kiryanov A.E. Platforms of Digital Experience and Digital Transformation in an Innovative Economy. *Sovremennye tekhnologii upravleniya*, 2018, vol. 4, no. 87(1), art. no. 87103. (In Russ.). Available at: <https://sovman.ru/en/article/87103/> (accessed 22.05.23).
14. Mokhiev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mamatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (the Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 313–319. <https://doi.org/10.5937/jaes16-16908>
15. *On the Specifics of Granting Citizens Land Plots Owned by the State or Municipal and Located in the Arctic Zone of the Russian Federation and Other Territories of the North, Siberia, and the Far East of the Russian Federation, and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation*. Federal Law RF, No. 119-FZ, 01.05.2016. (In Russ.).
16. Osipov A., Dmitriev V., Kovyazin V., Romanchikov A. Cartographo-Mathematical Modelling of Landscape Diversity for Land Use Planning Purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 574, art. no. 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012058>
17. Pashkevich M.A., Bech J., Matveeva V.A., Alekseenko A.V. Biogeochemical Assessment of Soils and Plants in Industrial, Residential and Recreational Areas of Saint Petersburg. *Zapiski gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2020, no. 241, pp. 125–130. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125>
18. Pashkevich M.A., Petrova T.A. Assessment of Widespread Air Pollution in the Megacity Using Geographic Information Systems. *Zapiski gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 738–742. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/pmi.2017.6.738>
19. Patokin D., Danilov A., Isakov A. Environmental Monitoring of Natural Waters in the Zone of Impact of an Enterprise Producing Explosives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 578, no. 1, art. no. 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012038>
20. Pesotskaya E., Selyutina L., Egorova L. Actual Aspects of Modeling Method Application in Organization of Construction Management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 687, no. 4, art. no. 044005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/4/044005>
21. Potseshkovskaya I.V., Soroka A.N. Revitalization of Urban Industrial Areas Based on Sustainable Development Principles. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 266, art. no. 08012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126608012>
22. *Public Cadastral Map*. Official website of Rosreestr. Available at: <https://pkk.rosreestr.ru/> (accessed 22.05.23).
23. Reizenbuk K., Sarapulova T., Shchedrin S., Shchedrina I. Application of Distributed Computing in Developing Architecture of Intelligent Information System for Automated Stock Exchange Trading. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2019, vol. 11, no. 8, pp. 2549–2555.
24. Romanchikov A.Y., Kovyazin V.F., Zhivotyagina N.I., Kitcenko A.A., Dang L.A.T. Algorithm of Forestland Mass Cadastral Evaluation Using Forest Inventory Data. *Izvestiya*

*Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzining georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 108–116. (in Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2890>

25. Samarina V.P., Skufina T.P., Savon D.Yu., Shinkevich A.I. Management of Externalities in the Context of Sustainable Development of the Russian Arctic Zone. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 14, art. no. 7749. <https://doi.org/10.3390/su13147749>

26. Yurak V., Dushin A., Mochalova L. Vs Sustainable Development: Scenarios for the Future. *Zapiski gornogo instituta* = Journal of Mining Institute, 2020, vol. 242, pp. 242–247. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.242>

27. Vasilenko N., Khaikin M., Lapinskas A. Ways of Achieving the Institutional Equilibrium in the Context of an Emerging Single Digital Space. *Studies in Computational Intelligence*, 2019, vol. 826, pp. 559–567. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_61)

28. Volkodaeva M.V., Taranina O.A., Volodina Y.A., Kuznetsov V.A. Development of Industrial Environmental Control Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 378, art. no. 012108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012108>

**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\*232(470.13)

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-195-204

## Плантационное выращивание *Pinus sibirica* Du Tour в реднетаежной зоне Республики Коми

**Е.И. Паршина**<sup>1</sup>✉, канд. биол. наук, доц.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9482-8612>

**О.В. Дымова**<sup>2</sup>, д-р биол. наук; ResearcherID: [A-7322-2016](https://orcid.org/0000-0003-2008-6350),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2008-6350>

**Е.В. Титов**<sup>3</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5729-7886>

<sup>1</sup>Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Россия, 167982; [helen-parshina@yandex.ru](mailto:helen-parshina@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия, 167982; [dymovao@ib.komisc.ru](mailto:dymovao@ib.komisc.ru)

<sup>3</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; [lesovod\\_taks@vglta.vrn.ru](mailto:lesovod_taks@vglta.vrn.ru)

Поступила в редакцию 11.04.21 / Одобрена после рецензирования 15.07.21 / Принята к печати 21.07.21

**Аннотация.** Для создания коллекции ценного генофонда кедровых сосен *Pinus sibirica* в условиях Республики Коми на территории учебно-лабораторного центра Сыктывкарского лесного института были посажены подвойные культуры сосны кедровой сибирской местного северо-западного климатического типа из разных районов Республики и Архангельской области. Приведены результаты анализа изменчивости морфологических параметров и динамики роста данных культур. В качестве морфометрических параметров использованы высота, диаметр ствола и диаметр кроны. Изменчивость исследуемых признаков находилась в пределах от 18,8 до 93,1 %. Средняя высота растений составила 72,2±3,9 см, диаметр ствола – 2,0±0,1 см. Самым изменчивым признаком оказался диаметр кроны – от 11 до 148 см при  $C_v$  от 30,6 до 93,1 %. Наиболее развитыми по исследуемым морфометрическим параметрам были растения яренского происхождения. Средний прирост растений *P. sibirica* в высоту в возрастной группе 9–11 лет за три года составил 13,5±0,9 см. Минимальный прирост отмечен у растений сысольской группы (1 см), максимальный – у растений яренского происхождения (38 см). Растения всех групп показали равномерное увеличение общего прироста в высоту за период исследований. Вариабельность данного признака снижалась только у группы растений яренского происхождения. Максимальная вариабельность по всем трем показателям отмечена у растений сыктывкарского происхождения ( $C_v$  – от 39,7 до 93,1 %). В целом показана высокая вариабельность прироста *P. sibirica* в течение 3 лет во всех исследованных группах. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего изучения развития и наследования хозяйственно-ценных признаков и декоративных особенностей *P. sibirica* в условиях подзоны средней тайги Республики Коми.

**Ключевые слова:** сосна сибирская кедровая, *Pinus sibirica* Du Tour, привой, подвой, биометрические показатели, прирост в высоту, прирост по диаметру, подзона средней тайги, Республика Коми

**Благодарности:** Авторы выражают признательность руководителю «Школы юного лесовода» Дымовой Л.М., инженеру Сыктывкарского лесного института Мухиной Н.К. и студентам Сыктывкарского лесного института Макуриной А.А. и Кузнецовой А.А. за помощь в организации и проведении исследований.

**Для цитирования:** Паршина Е.И., Дымова О.В., Титов Е.В. Плантационное выращивание *Pinus sibirica* Du Tour в среднетаежной зоне Республики Коми // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 195–204. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-195-204>

Original article

### Plantation Cultivation of *Pinus sibirica* Du Tour in the Middle Taiga Subzone of the Komi Republic

**Elena I. Parshina**<sup>1</sup>✉, Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9482-8612>

**Olga V. Dymova**<sup>2</sup>, Doctor of Biology; ResearcherID: [A-7322-2016](https://orcid.org/0000-0003-2008-6350)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2008-6350>

**Evgenii V. Titov**<sup>3</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5729-7886>

<sup>1</sup>Syktvykar Forestry Institute – branch of Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, ul. Lenina, 39, Syktvykar, 167982, Russian Federation; [helen-parshina@yandex.ru](mailto:helen-parshina@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of Russian Academy Sciences, ul. Kommunistycheskaya, 28, Syktvykar, 167982, Russian Federation; [dymovao@ib.komisc.ru](mailto:dymovao@ib.komisc.ru)

<sup>3</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; [lesovod\\_taks@vglta.vrn.ru](mailto:lesovod_taks@vglta.vrn.ru)

Received on April 11, 2021 / Approved after reviewing on July 15, 2021 / Accepted on July 21, 2021

**Abstract.** In order to create a valuable gene pool of cedar pines in the conditions of the Komi Republic, rootstock crops of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) were planted on the territory of laboratory training center of the Syktvykar Forest Institute. The plants were collected from different areas of the Komi Republic and the Arkhangelsk region for adjustment to the local, northwestern climate. The paper presents the results of the variational analysis of morphological parameters and growth dynamics in *P. sibirica* cultures. Height, trunk diameter, and crown diameter were chosen as the morphometric criteria. The variability of the studied traits ranged from 18.8 to 93.1 %. The average height of the plants was  $72.2 \pm 3.9$  cm, the average trunk diameter was  $2.0 \pm 0.1$  cm. The most changeable characteristic was the diameter of the crown of the plants, which ranged between 11 and 148 cm with  $C_v$  of 30.6–93.1 %. The plants of Yarensk origin were the most developed according to the examined morphometric criteria. The average growth of *P. sibirica* plants in height within the age group of 9–11 years over three years was  $13.5 \pm 0.9$  cm. The lowest growth rate was registered in plants of the Sysola group (1 cm), whereas plants of Yarensk origin had the highest growth rate (38 cm). Throughout the research period, plants of all groups had a consistent rise in overall height. However, this trait variability was reduced only in the group of plants of Yarensk origin. The maximum variability in all three traits was



observed in plants of Syktyvkar origin with  $C_v$  of 39.7–93.1 %. In general, high variability in the development of Siberian pines over three years across all experimental groups was detected. The investigation results can be applied for further research on the development and inheritance of economically valuable traits and decorative characteristics of *P. sibirica* in the conditions of the middle taiga subzone of the Komi Republic.

**Keywords:** Siberian cedar pine, *Pinus sibirica* Du Tour, grafting, wilding, biometric indicators, growth rate in height, growth rate in diameter, middle taiga subzone, Komi Republic

**Acknowledgments:** The authors gratefully acknowledge the assistance of L.M. Dymova, the head of the “School of Young Forester”, N.K. Mukhina, engineer of the Syktyvkar Forest Institute, A.A. Makurina and A.A. Kuznetsova, students at the Syktyvkar Forest Institute, in the organization and conduct of the research.

**For citation:** Parshina E.I., Dymova O.V., Titov E.V. Plantation Cultivation of *Pinus sibirica* Du Tour in the Middle Taiga Subzone of the Komi Republic. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 3, pp. 195–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-195-204>

### Введение

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) относится к подроду *Strobus* Lemmon, секция – *Quinquefolius* Duhamel [17, 19] и является важным лесообразующим и хозяйственно-ценным видом. Она имеет обширный ареал, охватывающий районы северо-востока европейской части России, Северный и Средний Урал, Западную и Восточную Сибирь. В условиях европейской таежной зоны в составе еловых и елово-пихтовых лесов ареал *P. sibirica* описан Н.И. Непомилуевой (1974) [9]. За пределами России вид встречается на территории Северной Монголии, в Китае, Казахстане [17, 22]. Общая площадь лесов с преобладанием *P. sibirica* в Евразии составляет около 30 млн га.

В Республике Коми ареал *P. sibirica* находится на северном и западном пределах распространения вида, поэтому вид включен в региональную Красную книгу. Большая часть ареала приходится на Приполярный и Северный Урал (на севере – до верховьев р. Косью), бассейн р. Печоры (на севере – до 650 30' с. ш.), верхнее течение р. Ижмы, Вычегды и Нема [5].

Формирование побегов *P. sibirica* определяется погодными условиями вегетационного периода [8]. Лимитирующими факторами распространения считаются влажность воздуха и почвы, колебания температуры. Вид характеризуется высокой устойчивостью к холоду: минимальная для произрастания теплообеспеченность по сумме среднесуточных температур выше 10 °С составляет 270–350 °С. Среднемесячная относительная влажность воздуха для условий произрастания *P. sibirica* в 13 ч. должна быть не ниже 45 %, ее среднегодовое значение – не менее 60 %, среднегодовая амплитуда температур – не более 35 °С [2, 6, 12]. Максимального развития *P. sibirica* достигает при сумме эффективных температур (выше 10 °С) в пределах 1600–1800 °С и значительном количестве годовых осадков (более 800 мм). Область экологического оптимума с наиболее ценным генофондом сосны кедровой сибирской находится в Черном поясе Алтае-Саянской горной провинции, в этих условиях возраст растений превышает 800–850 лет [15].

Биологическая характеристика фотосинтетического аппарата приведена в работах [4, 16]. Ранее нами [16] была показана физиологическая разнокачественность ассимиляционного аппарата *P. sibirica*, обусловленная возрас-

том хвои, что проявляется различием в содержании пластидных пигментов (хлорофиллов и каротиноидов), наличии компонентов ксантофиллового цикла (зеаксантина, антераксантина и виолаксантина) и скорости фотосинтеза. Установлено, что зрелая хвоя содержит максимальное количество пигментов в июле–сентябре (до 3 мг/г сухой массы хлорофиллов и 1 мг/г сухой массы каротиноидов) и фотосинтезирует со скоростью 1,5 мгСО<sub>2</sub>/(г сухой массы · ч) при фотосинтетически активной радиации выше 1000 мкмоль/(м<sup>2</sup> · с), или около 250 Вт/м<sup>2</sup>. Структурно-функциональная организация ассимилирующих органов способна обеспечивать успешный рост *P. sibirica* на Европейском Северо-Востоке.

Сосна кедровая сибирская является ценной орехоплодной культурой, семена которой богаты белком, витаминами, микроэлементами и полиненасыщенными жирными кислотами. Экспериментально доказано [21], что именно по наличию полиненасыщенных жирных кислот можно провести таксономический и филогенетический анализ представителей рода *Pinus*.

В настоящее время *P. sibirica* активно выращивается за пределами своего ареала на территории России и в других странах. Так, например, с 1990 г. в Китае в горах Большого и Малого Хингана, горах Чанбайшань были осуществлены посадки сосны кедровой сибирской [18, 21]. Проведенные интродукционные исследования в Лесном центре г. Бичжоу (Лесное бюро р-на Синьлинь) свидетельствуют об успешном внедрении вида на земли северо-восточного Китая [20, 21].

В 2009 г. на территории учебно-лабораторного центра Сыктывкарского лесного института (СЛИ) была открыта природная лаборатория «Дендрологический участок». Ее задачами являются создание коллекций ценного генофонда древесных растений, осуществление учебной, учебно-исследовательской и просветительской деятельности в области лесного и лесопаркового хозяйства. Одним из первых видов, высаженных на данной территории, была сосна кедровая сибирская. Впоследствии посадки дополнены другими видами, заложены опытно-экспериментальные участки по агрохимии, ботанике, растениеводству.

Тесное сотрудничество кафедры с кафедрой лесоводства, лесной таксации и лесоустройства Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова позволило заложить основы развития нового научного направления – создание экспериментальной базы для закладки прививочных высокоурожайных промышленных орехопродуктивных плантаций *P. sibirica*. Исследовательская деятельность по этому направлению начата в 2015 г. и в настоящее время реализуется в рамках научных исследований кафедры «Ландшафтная архитектура, строительство и землеустройство» по теме «Использование ценного генофонда *P. sibirica* Du Tour и *P. cembra* L. для создания целевых плантаций и озеленительных посадок в Республике Коми» [10].

Для получения коллекции ценного генофонда кедровых сосен в разные годы посажены подвойные культуры кедра сибирского местного северо-западного климатического типа из разных районов Республики Коми и Архангельской области:

1. Сторожевское лесничество (с. Сторожевск, Республика Коми; 61°56'31" с. ш. 52°19'00" в. д., высота над уровнем моря – 93 м), возраст – 20 лет;

2. Сысольское лесничество (с. Визинга, Республика Коми; 61°04'29" с. ш. 50°06'11" в. д., высота над уровнем моря – 108 м), возраст – 9 лет;
3. Сыктывкарское лесничество (г. Сыктывкар, Республика Коми; 61°40'35" с. ш. 50°48'35" в. д., высота над уровнем моря – 150 м), возраст – 11 лет;
4. Село Яренск (Архангельская область; 62°10'03" с. ш. 49°05'29" в. д., высота над уровнем моря – 91 м), возраст – 9 лет.

Использование в качестве подвоя растений разного возраста позволяет изучить степень проявления свойств генотипа (рост, цветение, плодоношение), сильно модифицированных влиянием подвоя [13].

При создании прививочной плантации *P. sibirica* на территории учебно-лабораторной базы СЛИ были выполнены прививки 9–11-летних адаптированных саженцев местного (г. Сыктывкар) происхождения. Привоем служили растения *P. sibirica* горно-алтайского происхождения, клонированные в Сомовском лесничестве Воронежской области, и сорт-клон близкородственного вида *P. cembra* с клоново-испытательной плантации учебно-опытного хозяйства «Межадорское» (Республика Коми). Ранее эти растения были отселектированы по фенотипическим признакам урожайности (протяженности плодоносящей части кроны и количеству плодоносящих побегов) профессором Е.В. Титовым. Прививка осуществлялась вприклад сердцевинной привоя на камбий подвоя в верхней или средней части прошлогоднего центрального побега [12]. В работе [14] показано, что функциональная организация ассимилирующих органов и сохранение высокой скорости фотосинтеза хвои – от 4 до 9 мг CO<sub>2</sub>/(г сухой массы · ч) – обеспечивают успешный рост прививок и высокую семенную продуктивность при плантационном выращивании сосны кедровой европейской в условиях среднетаежной подзоны Европейского Северо-Востока.

Создаваемая клоново-испытательная плантация на территории учебно-лабораторного центра СЛИ станет научной базой для изучения роста, развития и наследования хозяйственно-ценных признаков и декоративных особенностей растений, изучения адаптации клонов *P. sibirica* и *P. cembra* различного происхождения в условиях подзоны средней тайги Республики Коми. Кроме того, данная плантация позволит отселектировать хозяйственно-ценные генотипы-клоны кедровых сосен для плантационного ореховодства кедровых сосен и ландшафтно-декоративные формы для озеленения в северном регионе.

Цель исследования – изучение морфобиометрических показателей и динамики роста культур *P. sibirica* различного происхождения (потенциального подвоя) на территории учебно-опытного участка СЛИ.

#### Объекты и методы исследования

Исследования проводили в 2018–2020 гг. на территории учебно-опытного участка лаборатории «Дендрологический участок» СЛИ. Участок расположен на северо-востоке европейской части России, в подзоне средней тайги (61°38'41" с. ш. 50°47'22" в. д.). Среднемесячная температура самого теплого месяца (июль) – 16,6 °С, самого холодного (январь) – –15,5 °С. Период со среднесуточной температурой ниже 0 °С длится 173 дн. Годовая амплитуда составляет 32,3 °С. Начало вегетации (переход среднесуточной температуры через +5 °С) отмечается в последней декаде апреля. Сумма эффективных температур (выше +5 °С) по средним многолетним данным составляет 1750–1900 °С. Про-

должительность вегетационного периода равна 145–150 дн., активной вегетации со среднесуточными температурами +10 °С – 90–110 дн., сумма суточных температур – 1450 °С. В течение года выпадает 560 мм осадков, за апрель–октябрь – 387 мм. Среднемесячная относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца в 15 ч. – 60 %, наиболее холодного – 82 % [1, 11].

У всех растений в конце трех вегетационных периодов проводили измерение высоты, диаметров ствола, кроны, текущего прироста. Для обработки данных полевых исследований использовали стандартные методы математической статистики и пакеты прикладных программ Excel и Statistica 6.0. Статистическая достоверность приведена по первому порогу вероятности безошибочных прогнозов ( $P = 0,95$ ). Уровень изменчивости определяли по С.А. Мамаеву [7].

#### Результаты исследования и их обсуждение

На территории учебно-лабораторной базы приживаемость саженцев *P. sibirica* составила 89,8 %; сеянцев – 33,3 % (послевсходовый отпад – 17,5 %); приживаемость привоя – 58,3 %. Возраст – от 7 до 21 года.

Биометрические показатели и рост *P. sibirica* различного географического происхождения изучали у 9–11-летних растений (табл. 1). Их средняя высота составляла  $72,2 \pm 3,9$  см и варьировала в широких пределах – от 32 до 140 см.

Таблица 1

#### Морфометрические показатели растений *Pinus sibirica* на территории учебно-лабораторного центра Сыктывкарского лесного института (возрастная группа 9–11 лет)

#### Morphometric traits of *Pinus sibirica* plants on the territory of laboratory training center of the Syktyvkar Forest Institute (age group 9–11 years)

Происхождение культур (биологический возраст / число растений)	Высота		Диаметр ствола		Диаметр кроны	
	M±m (min–max), см	C <sub>v</sub> %	M±m (min–max), см	C <sub>v</sub> %	M±m (min–max), см	C <sub>v</sub> %
Сысольское лесничество (9 / 28)	50,8±3,6 (32–70)	25,8	1,1±0,5 (0,8–1,6)	20,0	23,6±2,8 (11–50)	43,3
Сыктывкарское лесничество (11 / 18)	66,7±10,9 (37–112)	39,7	1,5±0,4 (0,8–3,7)	70,7	31,3±11,9 (13–90)	93,1
Село Яренск (9 / 23)	85,7±4,6 (50–140)	26,0	2,6±0,1 (1,6–3,5)	18,8	91,1±5,8 (40–148)	30,6
Среднее	72,2±3,9 (32–140)	35,4	2,0±0,1 (0,8–3,7)	44,2	61,6±6,2 (11–148)	65,5

Примечание: M±m – среднее ± ошибка среднего.

Наибольшей высотой отличались растения сосны кедровой яренского происхождения по сравнению с сысольским (статистически достоверно при  $P < 0,05$ ) и сыктывкарским (при  $P = 0,1$ ) происхождениями. Уровень изменчивости признака оказался повышенным для растений яренских и сысольских ( $C_v$  – 25,8 и 26 %)



происхождений и высоким (39,7 %) для растений из сыктывкарского лесничества. Средний диаметр ствола составлял  $2,0 \pm 0,1$  см (от 0,8 до 3,7 см). Данный показатель как менее изменчивый признак изменялся на среднем уровне у растений из Яренска и Сысольского лесничества (коэффициент вариации соответственно составил 18,8 и 20,0 %). Группа растений из Сыктывкарского лесничества отличалась очень высокой вариабельностью диаметра ствола –  $C_v = 70,7$  %. Наибольшие диаметры ствола отмечены у растений яренского происхождения ( $P < 0,05$ ). Диаметр кроны варьировал от 11 до 148 см. Это сильно изменчивый признак ( $C_v$  – от 30,6 до 93,1 %). Наиболее высокие показатели ( $P < 0,05$ ) имели растения яренского происхождения: крона у них в 3–4 раза шире, чем у растений сыктывкарского и сысольского происхождений.

Полученные результаты позволили установить, что в возрастной группе 9–11 лет наиболее развитыми (по высоте, диаметрам ствола и кроны) были растения яренского происхождения. Изменчивость исследуемых параметров находилась в пределах от 18,8 до 93,1 %. Максимальную вариабельность всех трех показателей отмечали у растений сыктывкарского происхождения ( $C_v$  – от 39,7 до 93,1 %).

Средний прирост растений в высоту в исследуемой возрастной группе за 3 года составил  $13,5 \pm 0,9$  см (табл. 2). Минимальное значение признака установлено у растений сосны кедровой сысольского происхождения, максимальное – у растений яренского происхождения. В группе растений сысольского происхождения отмечен пониженный равномерный ( $P < 0,05$ ) прирост при среднем значении  $7,1 \pm 0,6$  см, максимальном – 24 см, минимальном – 1 см; уровень вариабельности признака «повышенный» и «очень высокий» ( $C_v$  – от 33,6 до 76,8 %). Прирост растений сыктывкарского происхождения по высоте – пониженный неравномерный ( $P < 0,05$ ), в среднем –  $7,9 \pm 1,3$  см. Для данной группы характерна высокая вариабельность признака по сравнению с другими группами ( $C_v$  – от 34,3 до 83,8 %); минимальный прирост составил 2 см, максимальный – 16 см. У растений яренского происхождения зафиксировано увеличение прироста по годам ( $P < 0,05$ ). При этом отмечалось снижение вариабельности признака по годам (коэффициент вариации в 2018 г. составил 58,4 %; в 2020 г. – 34,3 %).

Таблица 2

**Прирост растений *Pinus sibirica* на территории учебно-лабораторного центра Сыктывкарского лесного института (возрастная группа 9–11 лет)**

**Growth of *Pinus sibirica* plants on the territory of laboratory training center of the Syktyvkar Forest Institute (age group 9–11 years)**

Происхождение культур	2018		2019		2020		Среднее	
	M±m (min–max), см	$C_v$ , %	M±m (min–max), см	$C_v$ , %	M±m (min–max), см	$C_v$ , %	M±m (min–max), см	$C_v$ , %
Сысольское лесничество	$7,7 \pm 1,5$ (1–24)	76,8	$7,7 \pm 0,6$ (4–14)	33,6	$5,9 \pm 0,7$ (2–13)	48,0	$7,1 \pm 0,6$ (1–24)	57,3
Сыктывкарское лесничество	$11,0 \pm 1,9$ (7–16)	34,0	$5,5 \pm 1,5$ (4–10)	54,5	$7,2 \pm 3,0$ (2–16)	83,8	$7,9 \pm 1,3$ (2–16)	59,4
Село Яренск	$12,4 \pm 1,6$ (2–27)	58,4	$20,7 \pm 2,2$ (5–38)	50,4	$24,2 \pm 1,8$ (9–36)	34,3	$19,2 \pm 1,2$ (2–38)	52,0
Среднее	$10,4 \pm 1,0$ (1–27)	64,7	$14,3 \pm 1,6$ (4–38)	71,7	$15,6 \pm 1,7$ (2–36)	71,6	$13,5 \pm 0,9$ (1–38)	72,6

Таким образом, анализ данных свидетельствует о высокой вариабельности прироста *P. sibirica* по высоте, диаметрам ствола и кроны в течение 3 лет в группах всех географических происхождений. Увеличение прироста у растений яренского происхождения, вероятно, обусловлено успешной адаптацией саженцев к неблагоприятным для них условиям [3] в связи с тем, что при посадке были использованы саженцы с закрытой корневой системой. Растения сысольского и сыктывкарского происхождений пересаживались с открытой корневой системой.

#### Выводы

1. Анализ морфобиометрических показателей растений *Pinus sibirica* на территории учебно-лабораторного центра Сыктывкарского лесного института выявил высокую изменчивость высоты растений, диаметров ствола и кроны. Максимальную вариабельность проявили растения местного происхождения.

2. Показано, что в возрастной группе 9–11 лет наиболее развитыми по исследованным признакам являются растения яренского происхождения.

3. В течение 3 лет исследований наиболее энергичный рост наблюдали у растений сосны кедровой яренского происхождения, пересаженных с закрытой корневой системой, наиболее медленный – у пересаженных с открытой корневой системой деревьев сыктывкарского и сысольского происхождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / отв. ред. А.И. Таскаев. М.: Дрофа. Дизайн. Информация. Картография, 1997. 113 с.

*Atlas of the Komi Republic on Climate and Hydrology*. Ed. by A.I. Taskaev. Moscow, Drofa. Dizayn. Informatsiya. Kartografiya. Publ., 1997. 113 p. (In Russ.).

2. Братилова Н.П., Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Биология и формовое разнообразие сосны кедровой сибирской // Эко-потенциал. 2014. № 1(5). С. 120–127.

Bratilova N.P., Matveyeva R.N., Butorova O.F. Biology and Diversity of Cedar Siberian Pine Forms. *Эко-потенциал*, 2014, no. 1(5), pp. 120–127. (In Russ.).

3. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С., Суховольский В.Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 2002. 150 с.

Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Sukhovol'skiy V.G. *Density and Productivity of Woody Cenoses*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2002. 150 p. (In Russ.).

4. Загирова С.В. Количественная характеристика фотосинтетического аппарата *Pinus sibirica* (Pinaceae) на европейском Северо-Востоке // Ботан. журн. 2008. Т. 93, № 2. С. 221–230.

Zagirova S.V. Quantitative Characteristics of Photosynthetic Apparatus of *Pinus sibirica* (Pinaceae) in European North-East. *Botanicheskii zhurnal*, 2008, vol. 93, no. 2, pp. 221–230. (In Russ.).

5. Красная книга Республики Коми / Правительство Республики Коми, М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми; сост. А.В. Бобрецов и др.; гл. ред. С.В. Дёгтева. 3-е изд., офиц. Сыктывкар: Коми респ. тип., 2019. 767 с.

*Red Data Book of the Komi Republic*. Ed. by S.V. Degteva. 3rd edition. Syktyvkar, Komi respublikanskaya tipografiya Publ., 2019. 767 p. (In Russ.).

6. Крылов Г.В., Таланцев Н.К., Козакова Н.Ф. Кедр. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 216 с.

Krylov G.V., Talantsev N.K., Kozakova N.F. *Cedar*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 216 p. (In Russ.).

7. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1972. 284 с.
- Мамаев S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (A Case Study of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 284 p. (In Russ.).
8. Некрасова Т.П. Биологические основы семеношения кедр сибирского. Новосибирск: Наука, 1972. 274 с.
- Nekrasova T.P. *Biological Principles of Siberian Cedar Seed Production*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 274 p. (In Russ.).
9. Непомилуева Н.И. Кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) на северо-востоке европейской части СССР. Л.: Наука, 1974. 184 с.
- Непомилуева N.I. *Siberian Cedar in the North-East of the European Part of the USSR*. Leningrad, Nauka Publ., 1974. 184 p. (In Russ.).
10. Паришина Е.И. Формирование коллекционного фонда растений лаборатории «Дендрологический участок» Сыктывкарского лесного института // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2017. № 10. С. 7–9.
- Parshina E.I. Formation of Collection Fund of Plants of Dendrology Site Laboratory of the Syktyvkar Forest Institute. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki* = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences, 2017, no. 10, pp. 7–9. (In Russ.).
11. Титов Е.В. Кедр – царь сибирской тайги. М.: Колос, 2007. 176 с.
- Titov E.V. *Cedar – the King of the Siberian Taiga*. Moscow, Kolos Publ., 2007. 176 p. (In Russ.).
12. Титов Е.В. Орехопродуктивные кедровые плантации и лесосады. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 267 с.
- Titov E.V. *Nut-Producing Pine Plantations and Orchards*. Voronezh, VSUFT Publ., 2021. 267 p. (In Russ.).
13. Титов Е.В., Дымова О.В., Далькэ И.В. Биология и экофизиология сосны кедровой европейской на плантации в подзоне средней тайги северо-востока Европы. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2012. 98 с.
- Titov E.V., Dymova O.V., Dalke I.V. *Biology and Ecophysiology of Pinus cembra* L. in the Middle Taiga Subzone of European North-East. Syktyvkar, Komi SC UB RAS Publ., 2012. 98 p. (In Russ.).
14. Усольцев В.А., Крудышев В.В. Об экологии и географии кедр сибирского // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2011. Вып. 28. С. 147–153.
- Usoltsev V.A., Krudyshev V.V. About Ecology and Geography of Siberian Cedar. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2011, no. 28, pp. 147–153. (In Russ.).
15. Яцко Я.Н., Дымова О.В., Румак М.В. Содержание пигментов в хвое *Pinus sibirica* L., интродуцированной в подзоне средней тайги европейского Севера // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы I (XIV) Всерос. молодеж. науч. конф., Сыктывкар, 3–6 апр. 2007 г. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2007. С. 310–313.
- Yatsko Ya.N., Dymova O.V., Rumak M.V. The Content of Pigments in the Needles of *Pinus sibirica* L. Planted in the Subzone of the Middle Taiga of the European North. *Actual Problems of Biology and Ecology: Proceeding of the I (XIV) All-Russian Youth Scientific Conference. Syktyvkar, 3–6 April 2007*. Syktyvkar, Komi SC UB RAS Publ., 2007, pp. 310–313. (In Russ.).
16. Farjon A. *A Handbook of the World's Conifers*. The Netherlands, Leiden, Brill Publ., 2010, vol. 2. 1111 p. <https://doi.org/10.1163/9789047430629>
17. Gernandt D.S., López G.G., Garsia S.O., Liston A. Phylogeny and Classification of *Pinus*. *Taxon*, 2005, vol. 54, no. 1, pp. 29–42. <https://doi.org/10.2307/25065300>

18. Guangyi Z., Aiju H., Chuntain Y. Determination About Northwestern Area Limit of *Pinus koraiensis* and the Geographic Occurrence of *Pinus sibirica*. *J. Journal of Northeast Forestry University*, 1991, vol. 2, no. 1, pp. 42–47. <https://doi.org/10.1007/BF02874790>
19. He E., Bai R., Shen J., Zhao X., Cao Y. Study on Afforestation in the Experiment of Introducing *Pinus sibirica*. *J. Inn. Mong. Agric. Univ.*, 2000, vol. 21, no. 2, pp. 69–72.
20. Wang C. *Study on the Introduction and Seed Origin Experiment of Pinus sibirica*. Thesis for M.S. Northeast Forestry University, 2011, pp. 1–7.
21. Wolff R.L., Pedrono F., Pasquier E., Marpeau A.M. General Characteristics of *Pinus spp.* Seed Fatty Acid Compositions, and Importance of 5-Olefinic Acids in the Taxonomy and Phylogeny of the Genus. *Lipids*, 2000, vol. 35, no. 1, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11745-000-0489-y>
22. Zhao X., Wang C., Li S., Hou W., Zhang S., Han G., Pan D., Wang P., Cheng Y., Liu G. Genetic Variation and Selection of Introduced Provenances of Siberian Pine (*Pinus sibirica*) in Frigid Regions of the Greater Xing'an Range, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, no. 3, pp. 549–556. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0494-6>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interests:** 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