

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

2024

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)

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

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

2024

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)

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



## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- J. Kadlec, K. Novosadová, D. Palovčíková, M. Tomšovský, M. Kománek, R. Pokorný.* First Experience of Paulownia Bellissia® Cultivation in an Agroforestry System in the Czech Republic..... 9
- А.А. Дерюгин, Н.А. Рыбакова, Ю.Б. Глазунов.* Модель формирования березово-еловых насаждений в условиях южной тайги Русской равнины... 23
- Д.Е. Румянцев, Н.С. Воробьева.* Дендрэкологическое исследование роста осины в условиях Московской области..... 46
- А.С. Чеканышкин.* Рост и состояние дуба черешчатого в смешанных древостоях полезащитных лесных полос..... 65
- С.И. Тарасов, Н.В. Герлинг.* Иголоподобные листовые органы хвойных. Часть I. Моделирование периметра поперечного сечения иглы..... 73
- Е.А. Капица, М.А. Шорохова, Е.В. Моргун, А.А. Коретин, Е.В. Шорохова.* Крупные древесные остатки в коренных и вторичных среднетаежных ельниках..... 92
- С.Н. Сенькина.* Водообмен в хвойных фитоценозах под влиянием климатических изменений..... 107
- П.А. Феклистов, О.Н. Тюкавина, Н.Р. Сунгурова, С.С. Макаров, И.Н. Болотов, С.Н. Тарханов.* Особенности накопления минеральных элементов и азота в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной..... 118
- В.М. Мамедалиева, Г.С. Гейдарзаде.* Влияние аэрозолей на лесорастительный покров в юго-западном регионе Азербайджана..... 130

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

- В.А. Каляшов, В.Я. Шатино, И.В. Григорьев, О.А. Куницкая, И.С. Должиков, В.П. Друзьянова.* Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции..... 140
- К.П. Рукомойников, Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, Е.М. Царев, П.Н. Анисимов.* Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера..... 153

- Ш.Г. Зарипов, Ю.С. Пунтусова.* Экологические особенности конвективной сушки пиломатериалов..... 166

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

- Ю.Г. Хабаров, В.А. Вешняков, В.А. Плахин, Е.А. Скрипников, Д.В. Овчинников.* Нитрозирование лигносульфонатов в условиях твердофазного катализа..... 175

- Ф.Х. Хакимова, О.А. Носкова, Р.Р. Хакимов, И.И. Фонарёв.* Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов..... 188

*КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ*

- В.Г. Стороженко.* Структурные особенности коренных сосняков северной и средней тайги при пирогенных воздействиях..... 203
-



## CONTENTS

## FORESTRY

- J. Kadlec, K. Novosadová, D. Palovčíková, M. Tomšovský, M. Kománek, R. Pokorný.* First Experience of Paulownia Bellissia® Cultivation in an Agroforestry System in the Czech Republic..... 9
- A.A. Deryugin, N.A. Rybakova, Yu.B. Glazunov.* The Model of Birch-Spruce Plantations Formation in the Conditions of the Russian Plain Southern Taiga.... 23
- D.E. Rummyantsev, N.S. Vorob'yeva.* Dendroecological Research into Aspen Growth in the Conditions of the Moscow Region..... 46
- A.S. Chekanyshkin.* Growth and Condition of the English Oak in the Mixed Stands of Forest Shelterbelts..... 65
- S.I. Tarasov, N.V. Gerling.* Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part I. Modeling the Needle Cross-Section Perimeter..... 73
- E.A. Kapitsa, M.A. Shorokhova, E.V. Morgun, A.A. Korepin, E.V. Shorokhova.* Coarse Woody Debris in Primary and Secondary Middle Taiga Spruce Forests..... 92
- S.N. Sen'kina.* Water Exchange in Coniferous Phytocenoses under the Influence of Climate Change..... 107
- P.A. Feklistov, O.N. Tyukavina, N.R. Sungurova, S.S. Makarov, I.N. Bolotov, S.N. Tarkhanov.* Peculiarities of the Accumulation of Mineral Elements and Nitrogen in the Assimilation Apparatus of Scots Pine..... 118
- V.M. Mamedaliyeva, G.S. Heydarzade.* The Influence of Aerosols on Forest Vegetation Cover in the South-West of Azerbaijan..... 130

TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT  
IN FOREST MANAGEMENT AND WOOD PROCESSING

- V.A. Kalyashov, V.Ya. Shapiro, I.V. Grigor'ev, O.A. Kunitskaya, I.S. Dolzhikov, V.P. Druz'yanova.* The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction..... 140

- K.P. Rukomojnikov, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova, E.M. Tsarev, P.N. Anisimov.*  
The Influence of the Stand Composition on the Cycle Time of the Harvester..... 153
- Sh.G. Zaripov, Yu.S. Puntusova.* Environmental Features of Convective Lumber  
Drying..... 166

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

- Yu.G. Khabarov, V.A. Veshnyakov, V.A. Plakhin, E.A. Skripnikov, D.V. Ovchinnikov.*  
Nitrosation of Lignosulfonates under Solid-Phase Catalysis Conditions..... 175
- F.Kh. Khakimova, O.A. Noskova, R.R. Khakimov, I.I. Fonarev.* Integrated Re-  
cycling of Lignin-Containing Wood Waste..... 188

*BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE*

- V.G. Storozhenko.* Structural Features of the Indigenous Pine Forests  
of the Northern and Middle Taiga under Pyrogenic Influences..... 203
-





Original article

УДК 630\*56

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-9-22

## First Experience of Paulownia Bellissia® Cultivation in an Agroforestry System in the Czech Republic

**Jiří Kadlec**<sup>✉</sup>, Assistant Professor; ResearcherID: [X-9189-2018](https://orcid.org/0000-0002-0355-6456),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0355-6456>

**Kateřina Novosadová**, Assistant; ResearcherID: [I-5421-2018](https://orcid.org/0000-0002-5207-762X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-762X>

**Dagmar Palovčíková**, Assistant; ResearcherID: [E-6505-2014](https://orcid.org/0000-0002-4175-4568),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4175-4568>

**Michal Tomšovský**, University Professor; ResearcherID: [B-1263-2014](https://orcid.org/0000-0002-9505-6175),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9505-6175>

**Martin Kománek**, Assistant; ResearcherID: [HLQ-0105-2023](https://orcid.org/0000-0001-6057-5197),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6057-5197>

**Radek Pokorný**, Associate Professor, Head of Silviculture Department;

ResearcherID: [D-8208-2014](https://orcid.org/0000-0001-5121-6694), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5121-6694>

Mendel University in Brno, Zemědělská, 3, Brno, 61300, Czech Republic;

[jiri.kadlec.uzpl@mendelu.cz](mailto:jiri.kadlec.uzpl@mendelu.cz)<sup>✉</sup>, [katerina.novosadova@mendelu.cz](mailto:katerina.novosadova@mendelu.cz), [dagmar.palovcikova@mendelu.cz](mailto:dagmar.palovcikova@mendelu.cz),

[michal.tomsovsky@mendelu.cz](mailto:michal.tomsovsky@mendelu.cz), [martin.komanek@mendelu.cz](mailto:martin.komanek@mendelu.cz), [radek.pokorny@mendelu.cz](mailto:radek.pokorny@mendelu.cz)

Received on December 1, 2023 / Approved after reviewing on January 29, 2024 / Accepted on February 3, 2024

**Abstract.** *Paulownia* spp. comes from South-East Asia, where there is a tradition of its cultivation. Social pressure, in favour of the use of renewable sources of energy and sustainable agriculture, is on the rise. In this context, agroforestry has become a significant topic of interest. *Paulownia* spp. could be one of the species utilized in this field. That is why, in 2014, the experimental agroforestry system, which was intended for the production of fodder for farm animals, and also for the production of saw timber, was established in one of the warmest areas of the Czech Republic. The aim of this research was to evaluate the production potential of *Paulownia Bellissia*®. The measuring of the heights and thicknesses, and the determination of the extent to which the plants were damaged, were conducted during 2017–2020. The plantation consisted of two plots, where the plants on the first plot (treated plants) were regularly irrigated and annually pruned and those on the second (reference plants) were not. The treated plants reached a mean annual increment of 1.6 m in height and 2.8 cm in diameter at breast height, but almost 80 % were sunscalded, whereas the reference plants reached only 1.1 m and 2.0 cm but remained undamaged. Most of the damaged plants were also infested with parasitic fungi *Schizophyllum commune* and *Trametes hirsuta*, while the occurrence of *S. commune* on plantations of *Paulownia* was found as one of the first discoveries in the Czech Republic.



**Keywords:** sunscald, fungal pathogen, agroforestry system, dendrometric parameters, *Paulownia* spp., the Czech Republic

**Acknowledgements:** The authors thank JUKKA s.r.o. for permission to access the plantation to conduct our research and Jan Hobl for revision of the English language. This work was supported by H2020-EU.4.b. WIDESPREAD-05-2020 – Twinning; Grant agreement ID 952314 “Adaption strategies in forestry under global climate change impact (ASFORCLIC)”.

**For citation:** Kadlec J., Novosadová K., Palovčíková D., Tomšovský M., Kománek M., Pokorný R. First Experience of *Paulownia Bellissia*® Cultivation in an Agroforestry System in the Czech Republic. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 9–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-9-22>

Научная статья

### Первый опыт выращивания *Paulownia Bellissia* в системе агролесомелиорации Чешской Республики

**И. Кадлец**<sup>✉</sup>, ст. преподаватель; ResearcherID: [X-9189-2018](https://orcid.org/0000-0002-0355-6456),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0355-6456>

**К. Новосадова**, ассистент; ResearcherID: [I-5421-2018](https://orcid.org/0000-0002-5207-762X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5207-762X>

**Д. Паловчикова**, ассистент; ResearcherID: [E-6505-2014](https://orcid.org/0000-0002-4175-4568),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4175-4568>

**М. Томшовский**, проф.; ResearcherID: [B-1263-2014](https://orcid.org/0000-0002-9505-6175),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9505-6175>

**М. Команек**, ассистент; ResearcherID: [HLQ-0105-2023](https://orcid.org/0000-0001-6057-5197),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6057-5197>

**Р. Покорный**, доц., декан фак. лесн. хоз-ва; ResearcherID: [D-8208-2014](https://orcid.org/0000-0001-5121-6694),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5121-6694>

Университет им. Менделя в Брно, ул. Земедельска, д. 3, г. Брно, Чешская Республика, 61300; [jiri.kadlec.uzpl@mendelu.cz](mailto:jiri.kadlec.uzpl@mendelu.cz)<sup>✉</sup>, [katerina.novosadova@mendelu.cz](mailto:katerina.novosadova@mendelu.cz), [dagmar.palovcikova@mendelu.cz](mailto:dagmar.palovcikova@mendelu.cz), [michal.tomsovsky@mendelu.cz](mailto:michal.tomsovsky@mendelu.cz), [martin.komanek@mendelu.cz](mailto:martin.komanek@mendelu.cz), [radek.pokorny@mendelu.cz](mailto:radek.pokorny@mendelu.cz)

Поступила в редакцию 01.12.23 / Одобрена после рецензирования 29.01.24 / Принята к печати 03.02.24

**Аннотация.** В настоящее время увеличивается необходимость использования возобновляемых источников энергии и ведения устойчивого сельского хозяйства. В связи с этим агролесоводство представляет существенный интерес. *Paulownia* spp. может стать одним из видов, применяемых в этой области. Родина *Paulownia* spp. – Юго-Восточная Азия: здесь сложилась традиция ее выращивания. В 2014 г. в одном из самых теплых районов Чешской Республики была создана экспериментальная система агролесомелиорации, включающая посадки данного вида, предназначенная для производства сельскохозяйственных кормов, а также пиломатериалов. Цель исследования – оценить производственный потенциал деревьев *Paulownia Bellissia*. Измерения высоты и диаметра, а также определение степени повреждения деревьев проводились в период с 2017 по 2020 гг. Плантация была разделена на 2 участка: павловнию на 1-м участке регуляр-

но поливали и ежегодно подрезали, на 2-м участке (контроль) уходы не проводились. Обработываемые деревья характеризовались среднегодовым приростом 1,6 м в высоту и 2,8 см в диаметре на высоте груди, однако почти 80 % подверглись солнечным ожогам, тогда как контрольные деревья имели показатели 1,1 м и 2,0 см соответственно, но остались неповрежденными. Большинство поврежденных деревьев также оказались зараженными паразитическими грибами *Schizophyllum commune* и *Trametes hirsute*. При этом случай появления *S. commune* на плантациях павловнии стал одним из первых в Чешской Республике.

**Ключевые слова:** солнечный ожог, патогенный грибок, система агролесомелиорации, дендрометрические показатели, *Paulownia* spp., Чешская Республика

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность компании JUKKA s.r.o. за разрешение на доступ к плантации для проведения исследования и Я. Хоблу за редактуру англоязычного варианта статьи. Работа поддержана программой H2020-EU.4.b. WIDESPREAD-05-2020 – Twinning, грантовое соглашение № 952314 «Стратегии адаптации в лесном хозяйстве в условиях воздействия глобального изменения климата (ASFORCLIC)».

**Для цитирования:** Kadlec J., Novosadová K., Palovčíková D., Tomšovský M., Kománek M., Pokorný R. First Experience of *Paulownia Bellissia*® Cultivation in an Agroforestry System in the Czech Republic // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 9–22. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-9-22>

### Introduction

*Paulownia* spp., commonly, is a species characterized by extremely fast growth, intensive sprouting ability and adaptability to various climatic and soil conditions [16, 21, 60]. It produces wood that can be used for energy, or also as saw timber. It is therefore considered a suitable species for large-scale (i.e. plantation) production [2, 55]. Zhao-Hua et al. [60] state that one-year-old plants have a mean height of 4 m, and some can reach a height of more than 6 m. According to OXYTREE [36], six-year-old plants reach a height of up to 18 m and their mean diameter at breast height (DBH) should exceed 30 cm. The technical report published by UCLM [49] gave similar values (the six-year-old plants had a mean DBH of 30 cm, a mean height of 16 m, and a lumber log volume of 0.5 m<sup>3</sup>).

The native area of *Paulownia* spp. extends from the middle to the lower section of the Yangtze River [60]. At present, it grows on all continents (except Antarctica) as a decorative tree in parks and gardens, or as a source of wood in plantations and stands [19]. On the territory of the Czech Republic (the CR), *Paulownia* was first planted as a decorative tree in 1844 [51], and the first plantations began to appear around 2010 [17].

*Paulownia* spp. species are classified according to the level of cultivation as:

1) Wild (*Paulownia albiphloea* Z.H.Zhu sp.nov, *P. catalpifolia* T. Gong ex D.Y. Hong, *P. fargesii* Franch etc.), which occur scattered and only in valleys in China [60]. They are small and have crooked stems and, therefore, growing them in plantations would bring no economic benefit.

2) Semi-wild (also called “naturally crossed”: *Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl., *P. elongata* S.Y.Hu, *P. tomentosa* Steud. etc.) are the result of a long-term and targeted acclimatization [30, 39, 57, 60]. These have more intensive growth and greater resistance to disease than the wild species (above), however, they too are not suitable for plantations and are therefore planted in small groups [30, 39, 57].

3) Art (also called “artificially crossed hybrids”, hereinafter referred to as “hybrids”) started to be bred from the 1980s in China [39, 57]. The plant breeders tried to develop a strong, resistant, highly-quality and voluminous individual through crossing and artificial selection [30, 39, 57]. At present, there are dozens of hybrids on the market: Paulownia Shan Tong, P. Bellissia<sup>®</sup>, P. Clon *in vitro* 112<sup>®</sup>, P. Paulemia<sup>®</sup>, P. Shan Dong etc.

Agroforestry is defined as the management of an area where the cultivation of trees is combined with some form of agricultural production [12]. The development of modern forms of agroforestry in the CR began around 2000, when the uniform agricultural land was unable to meet the ecological and social demands that were placed on it. During 2015–2019, the alternation of extreme droughts with torrential rains highlighted the negative aspects of the sterile monoculture landscape and provoked a nation-wide discussion leading to an intensive utilization of the agroforestry systems in the conditions of the CR [33].

Wang and Shogren [55] wrote that Paulownia had been used in the agroforestry systems in China, and they estimated that there were three million hectares of land used for the agroforestry systems in the early 1990s. Yin [59] states that the utilization of Paulownia in the agroforestry system increases the volume of agricultural production. The using of Paulownia with cereals, as a type of the agroforestry system, increased the yield of wheat by about 23 % and of millet by about 20 % [1, 60]. Puxeddu et al. [42] mention the utilization of Paulownia in the agroforestry systems in Sicily and Hungary. Leaves and non-lignified parts of Paulownia are used in animal production as feed, because their nutritional content is greater [6]. In China, for example, the leaves are used as fodder for sheep, cattle and pigs [60].

The CR is, according to the maps based on PLANTMAPS. International Hardiness Zone Maps [40], located in the 7<sup>th</sup> zone, which stretches from the south-eastern part of Germany, the foothills of the Alps, throughout the CR, Slovakia (except the Tatra Mountains), almost all of Poland and the eastern part of Hungary, up to the southern Balkans (in the south) and the Baltic states (in the north). According to Köppen’s Climate Classification Map [27], the CR is located in the Dfb zone, which extends from eastern Germany, throughout Austria, the CR, Slovakia, Hungary and Romania to the upper part of the southern Balkans (in the south), the southern part of Scandinavia (in the north) and across the Baltic states, Belarus and Ukraine to the south-western part of Russia.

In 2014, the company JUKKA s.r.o. established an experimental agroforestry plantation, where the P. Bellissia<sup>®</sup> was intended as a source for saw timber, and the hay from the dried grass underneath for fodder for farm animals, which is basically a silvopastoral system, as one of the types of agroforestry system [12]. The measurement of the heights, DBH and finding of disease was conducted in 2017–2020, and its aim was to evaluate the production potential and possible occurrence of diseases of P. Bellissia<sup>®</sup> in the conditions of southern Moravia, as one of the warmest areas in the region of central and eastern Europe.

#### *Research Objects and Methods*

*Description of the Research Plot.* The plantation of P. Bellissia<sup>®</sup> was established in 2014 in two fenced areas at an altitude of ca 180–200 m a.s.l. One plot was in the centre of Uherský Ostroh (48°59'02.5" N; 17°23'42.9" E) and the second – in nearby

Ostrožská Nová Ves (48°59'59.0" N; 17°26'55.5" E). In the past, these two plots were used as agricultural lands and, according to our pedological survey, these types of soil are a Cambisol [22]. The plot in Uherský Ostroh had an area of ca 0.22 ha and the one in Ostrožská Nová Ves – an area of ca 0.02 ha. In the spring of 2014, the owner planted 60 plants in Uherský Ostroh and 12 in Ostrožská Nová Ves. The mean monthly air temperatures and precipitation within 2014–2020 that were obtained from the weather station in Staré Město (49°04'21.4" N; 17°26'16.5" E) are contained in the table below [8].

**The mean monthly air temperatures and precipitation for the studied territory**

Year	Month												ϕ annual
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
<i>Air temperature, °C</i>													
2014	1.8	4.1	8.2	11.4	14.2	18.3	21.4	17.7	15.7	11.3	8.0	2.3	11.2
2015	1.4	1.4	5.6	9.8	14.4	18.8	22.6	23.2	15.7	9.5	6.3	3.1	11.0
2016	-1.2	5.0	5.4	9.8	15.2	19.8	21.0	18.9	17.3	8.7	4.6	-0.2	10.4
2017	-5.1	1.4	7.8	8.9	15.6	20.4	20.9	21.7	14.1	10.4	4.9	1.6	10.2
2018	2.4	-2.0	2.6	15.0	18.3	19.9	21.6	23.2	16.1	12.0	6.2	1.5	11.4
2019	-1.4	2.4	6.8	11.4	12.1	22.2	20.3	21.1	14.9	11.2	8.0	2.7	11.0
2020	-0.1	5.0	5.4	10.3	12.3	18.1	19.3	20.9	15.5	10.3	4.8	3.0	10.4
<i>Precipitation, mm</i>													
2014	23.6	27.2	11.7	29.9	67.8	34.4	89.9	62.6	85.9	38.5	29.6	28.2	529.3
2015	37.9	11.7	31.0	23.7	46.1	19.7	50.6	91.3	39.8	31.5	33.7	11.8	428.8
2016	28.5	68.3	13.2	42.4	43.6	47.9	93.0	55.9	20.5	61.5	32.9	6.1	513.8
2017	23.7	21.5	18.9	59.7	49.5	46.7	78.5	21.7	96.7	52.1	40.4	38.5	547.9
2018	45.7	22.2	21.2	16.3	43.4	47.4	21.1	30.4	104.6	14.1	5.9	14.0	386.3
2019	34.2	19.0	32.5	19.6	92.6	39.7	56.3	46.8	62.1	45.9	41.4	47.9	538.0
2020	11.1	47.2	40.4	13.0	77.6	124.8	68.8	42.2	58.2	123.5	18.2	31.6	656.6

*P. Bellissia*<sup>®</sup> is a hybrid of *P. elongata* and *P. fortunei*. The resulting hybrid has been crossed with *P. elongata* [4]. *P. Bellissia*<sup>®</sup> has a trademark and it is registered in the Serbian Register of Protected Plant Varieties under no. 321-01-01676/2/2016-11, expiring on March 22, 2047 [46], and in the European Union under no. BR. 3417 [3].

*Silvicultural Treatment.* The planting material that had been cultivated from the root cuttings was planted in the form of container saplings, each of which had a volume of the root ball of about 1 litre, a height of ca 60 cm and a root collar ca 1.2 cm thick. The plots were fenced before planting. The plants were placed into the holes of 40 cm in diameter, 50 cm deep, and with a spacing of 4 × 3 m, where each was assigned a unique number, according to the row and its position within it. The dead plants were not replaced.

After the first year, at the beginning of the vegetation season, the stem of each plant was cut, leaving a 5 cm stump. After germination of the sprouts, the strongest (i.e. the healthiest and longest) sprout on each stump was chosen and the others removed. This silvicultural treatment is recommended for Paulownia [21, 49, 60]. The main objective of such treatment is to create a strong root system and, subsequently, a greater increment of the newly growing sprout [60].

The upper parts of the plants were damaged by frost each winter. Zhao-Hua et al. [60] stated that the above-ground parts of *P. fortunei*, *P. tomentosa* and *P. elongata* etc. are damaged by frost each winter, but there is no mention of what happens to *P. Bellissia*<sup>®</sup>. The terminal bud and the buds of the first two internodes are frequently damaged [60] and, if so, then the newly growing stem sprout, which is the highest on the stem, becomes the terminal shoot. The mulch tarps (50 × 50 cm in size) were laid out around the plants as protection against weed vegetation and removed after four years. All of the grass in the plantation was mowed and, successively, the hay was used as fodder for animals. The plants in Uherský Ostroh (hereinafter referred to as treated plants) were irrigated using a drip irrigation system during the drought, and regularly pruned up to a height of 5 m. The plants in Ostrožská Nová Ves (hereinafter referred to as reference plants) were not irrigated and pruned.

*Methods of Measurement.* The first time that the treated and reference plants were measured was 4 years after planting (i.e. autumn 2017), and then each year until autumn 2020. The total height of each plant was measured from the stem foot to the top using a telescopic measuring pole (in 2017 and 2018) and a Nikon Forestry pro II laser altimeter during 2018–2020. The circumference was measured at breast height with a circumference tape and recalculated to diameter, thus determining the DBH. The mean annual increments were obtained when the total heights and DBHs (that were measured / recalculated in 2020) were divided by 7 (i.e. the number of years of the existence of our plantation).

Each plant was measured (i.e. its height and circumference), examined and, if damaged, the cause was investigated.

*Statistical Analysis.* Statistical analysis of the data was performed using TIBCO Statistica<sup>™</sup> with a reliability interval of 95 %. The normality of the data distribution was examined before the main analysis. The main effects were analysed using ANOVA, after which Fisher's LSD test was applied, in order to identify the differences in the main effects and interactions.

### *Results and Discussion*

*Dendrometric Parameters.* After the 4th vegetation season, the mean height of the treated plants exceeded 7 m, which was about 35 % more than that of the reference plants ( $p = 0.0001$ ; Fig. 1). In the years 2018 and 2019, the mean height differences between the treated and reference plants were similar to that in 2017 (2018: 42 %;  $p = 0.0001$  and 2019: 34 %;  $p = 0.0001$ ). During the last measurement (autumn 2020), the mean height of the treated plants was 11.5 m ( $\pm 0.8$  m), which was about 33 % more than that of the reference plants ( $p = 0.0001$ ). The mean annual height increment was 1.3 m ( $\pm 0.1$  m), whereas that of the reference plants was only 1.1 m ( $\pm 0.3$  m; with  $p = 0.0001$ ).

After the 4th vegetation season, the mean DBH of the treated plants was greater than 14 cm, which was about 24 % more than that of the reference plants ( $p = 0.0001$ ; Fig. 1). In the years 2018 and 2019, the DBH differences between the treated and reference plants were similar to that in 2017 (both 24 %;  $p = 0.0001$ ). During the last measurement, the mean DBH of the treated plants was 20.1 cm ( $\pm 4.3$  cm), which was about 33 % more than that of the reference plants ( $p = 0.0001$ ). The mean annual thickness increment was 2.8 cm ( $\pm 0.6$  cm), whereas that of the reference plants was 2.0 cm ( $\pm 0.4$  cm;  $p = 0.0093$ ).

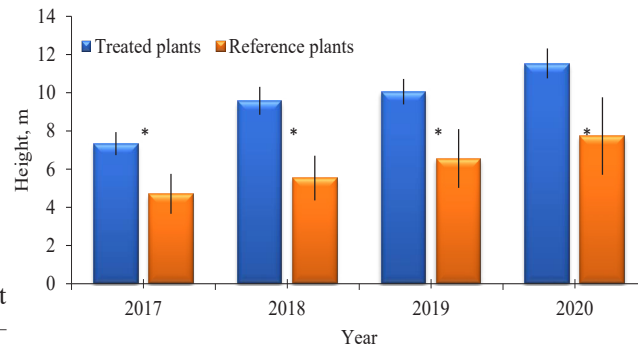
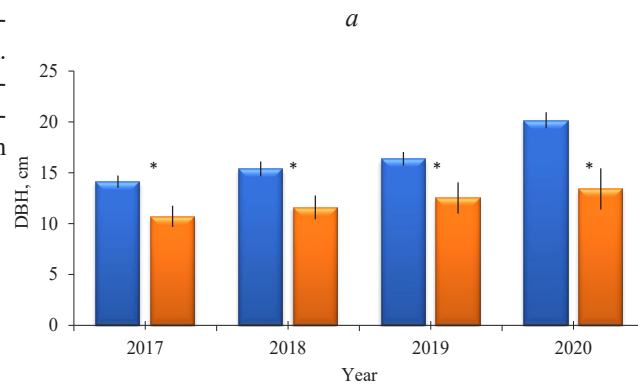


Fig. 1. The development of dendrometric parameters: *a* – development of height; *b* – development of DBH. The whiskers indicate standard deviation. Statistically significant differences between the treated and reference plants are marked with the asterisks



*b*

*Damage.* The first observation of the type and extent of the damage was conducted in 2017. In this year, all reference plants remained undamaged and 78 % of the treated plants were sunscalded (Fig. 2). During the following measurements, there was no increase in the numbers of the damaged plants (treated or reference). The sunscald always appeared on the lower half of the stems on the south or south-east side. During 2017–2020, we found the fruiting bodies of the wood-decaying parasitic fungi on most of the damaged stems. These bodies were always situated in the lower half of the stem, in places where the bark was sunscalded.

In 2017, the fruiting bodies were detected on the stems of 31 treated plants from a total number of 47 damaged plants (i.e. 66 %; Fig. 2). They were found to be *Schizophyllum commune* Fr. on 17 stems and *Trametes hirsuta* Wulfen (Lloyd) on 11 stems. The fruiting bodies of both fungi occurred on 3 stems. In 2018, the number of uninfected sunscalded plants decreased. In this year, 12 treated plants were only sunscalded. Moreover, we found the fruiting bodies of *S. commune* on 3 additional plants and *T. hirsuta* on 1 additional plant. Cumulatively, with the values from 2017, there were 20 plants infected with *S. commune* and 12 with *T. hirsuta*. In 2019, the number of uninfected sunscalded plants decreased further. There were only 8 sunscalded plants. On the other hand, the number of plants with the fruiting bodies increased. In this year (cumulatively with the previous years), there were fruiting bodies of *S. commune* on 22 plants and those of *T. hirsuta* on 13 plants and those of both fungi on 4 plants.

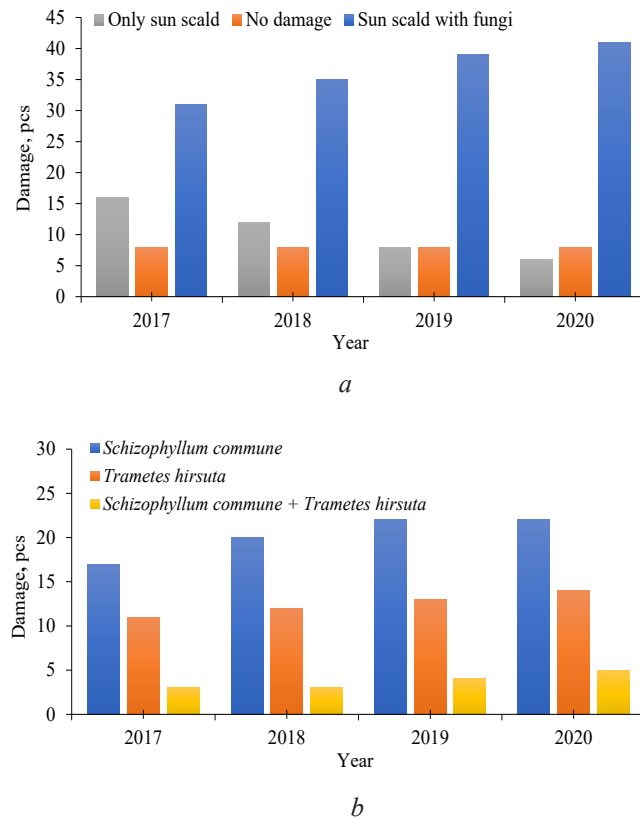


Fig. 2. The development of damage: *a* – development of the non-damaged plants and damaged plants; *b* – development of the fruiting bodies of the wood-decaying parasitic fungi on the sunscalded plants

In 2020, there were 6 uninfected sunscalded plants, 22 plants infected with *S. commune*, 14 with *T. hirsuta* and 5 with both.

We recorded different mean annual height increments of the treated and reference plants. The seller of *P. Bellissia*<sup>®</sup> promotes a total height of more than 15 m after 8–9 years from planting [5], which corresponds to a mean annual height increment between 1.6 and 1.8 m. On the other hand, Gyuleva et al. [18] describe the growth of a five-year-old plantation of hybrid *P. elongata* × *P. fortunei* in Bulgaria, and they state that the total height was 5 m five years after planting (i.e. the mean annual height increment was 1 m). The treated plants had a mean annual height increment of 1.3 m, which is slightly less than is the minimum value stated by the seller, and that of the reference plants was much less than that stated by the seller, however, both the treated and the reference plants had a greater mean annual height increment than those described by Gyuleva et al. [18].

The mean annual thickness increment should reach at least 3 cm [4, 5]. It is evident that that of the treated plants came only close to this value. The reference plants had an even smaller mean annual thickness increment. Gyuleva et al. [18] showed that the mean annual thickness increment was 1.2 cm in Bulgaria, which is smaller than those of the treated and reference plants.

A lack of precipitation was obviously one of the main factors affecting plant development. According to CHMI [8], the mean precipitation (that fell throughout the existence of the plantation) was 515 mm per year (i.e. ca 40 mm per month) and 320 mm per vegetation season (from April to September, i.e. ca 55 mm per month in the vegetation season). It seems that there is less precipitation than *Paulownia*



needs. UCLM [49] state that the minimum annual precipitation necessary for proper growth is 750 mm and Jabłoński [23] states at least 800 mm. Zhao-Hua et al. [60] wrote that Paulownia grows in areas where the amount of the precipitation varies in the range of 500 to 3,000 mm. However, they stress that if the precipitation drops to the minimum of this interval, then most of the precipitation should fall during the vegetation season. That did not happen at our locality because only slightly more than half of the total precipitation fell during the vegetation season. Also, BIO TREE and TGG [4, 48] described that Paulownia needs most of the precipitation to fall during the vegetation season. Moreover, TGG [48] claims that the monthly precipitation in the vegetation season should be at least of 150 mm in the first year after planting. The mean monthly precipitation in the vegetation season was only 55 mm on our plantation, which is only a third of the necessary amount given by TGG [48]. A possible precaution against drought – lack of rainfall – is irrigation [4, 23, 48, 49, 60], at least in the first years after planting [4, 48, 49]. Only the treated plants had drip irrigation installed. Due to this, it was possible to observe the influence of insufficient water. While these plants had a height of 11.5 m and a DBH of 20.1 cm in 2020, the reference plants had a height of 7.7 m and a DBH of 13.4 cm, which was very different and statistically significant.

The treated plants were pruned every year in such a way that the leaves and branches were removed from the lower part of the stem up to a height of 5 m (i.e. the crown was created at a height of 5 m and more). The same procedure is recommended by Martinik et al., Neilsen and Pinkard, Waugh and Yang and Zhao-Hua et al. [33, 35, 56, 60]. The reference plants were not pruned, which could also be one of the reasons as to why their growth slowed down [15, 35, 41, 60]. We assume that the pruning had a positive influence on the plant increment, however, this also brought about more damage by sunscald and subsequent attacks to the stem by the wood-decaying fungi.

Clatterbuck and Hodges, Kays et al., Paulownia Moravia and Zhao-Hua et al. [9, 25, 38, 60] describe the occurrence of damage by sunscald to Paulownia. We found out that it was only the treated plants (78 %) that had been damaged, whereas the reference plants remained healthy and undamaged. Moreover, we found the damage only during the first measurement and did not record other damage to the plants by sunscald during subsequent measurements. We therefore assume that this finding corresponds to the assumption that the sunscald appeared on the stem in the first years after planting, when the bark of younger Paulownias is thin and smooth [51], and therefore susceptible to this kind of damage [29]. Later, the bark becomes rougher and thicker [54] and, although it is exposed to solar radiation, it is no longer sunscalded [9, 25]. Moreover, we assume that the damage was caused by the activity of more factors – not only by solar radiation. In our case, it seems that other significant factors can be pruning in the first years because the sunscald appeared only on the treated plants. Jančařík, as well as Kays et al. [24, 25], show that species with smooth bark are sunscalded when their bark is suddenly exposed to solar radiation after pruning or felling of the surrounding trees.

The occurrence of the fruiting bodies of the wood-decaying fungi *S. commune* and *T. hirsuta* was recorded only on the sunscalded plants. It can be assumed that the sunscald was the gateway via which the spores of these fungi entered the stems [24]. *S. commune* (Basidiomycota, Agaricales, *Schizophyllaceae*) is a fungal parasite and saprotroph that causes white decay [10, 26]. This fungus has a wide range of potential

hosts (broadleaves and coniferous species), it can adapt, and therefore occurs in other types of biome, and on all continents, with the exception of Antarctica [7, 20, 26]. Holec et al. [20] describe very abundant occurrence on all the other parts of the tree, including those that are illuminated by sunlight. The fruiting bodies of *S. commune* appear a few weeks after the penetration of infection. They grow one year, then die, but they stay dry on the tree for a year or longer, and then fall to pieces. Sinclair and Lyon [45] show Paulownia as a possible host of *S. commune* in the cases, where the species is stressed by a lack of water and/or high temperature or has damage to the bark. Takemoto et al. [47] state that *S. commune* attacks trees through the sunscalded bark. Boháčová and Gáper [7] state that the infection penetrates the tree, causes its death and subsequent saprotrophic decomposition of the stump. Also, Černý [11] mentions that *S. commune* very quickly attacks live rough wood, including the stump.

The fungal pathogen – *T. hirsuta* – was also found on the sunscalded plants. Just like *S. commune*, *T. hirsuta* (Basidiomycota, Polyporales, *Polyporaceae*) is a fungal parasite and saprotroph attacking broadleaved species [31] worldwide [37]. It also has white rot and enters the tree through the sunscalded bark [31]. In the last century, in the region of Czechoslovakia, *T. hirsuta* was found even on *P. tomentosa* [28]. Milenković et al. [34] describe its occurrence on Paulownia in forest nurseries and plantations in Serbia. On our plantation, we recorded increasing occurrence of *S. commune* and *T. hirsuta* during the observation period. We always noticed the fruiting bodies of *S. commune* and then those of *T. hirsuta*. Boháčová and Gáper [7], who confirm this, wrote that *S. commune* is able to create suitable conditions for the colonization of the plant by other types of fungi.

From the economic point of view, the rough wood attacked by white decay cannot be used for the production of saw assortments but only for the production of wood-pulp, wood-based panels, chips etc. [50]. Moreover, we assume that the plants damaged by these pathogens will die. The new silvicultural rotation of these plants through stump coppicing will be problematic because, after felling: a) *S. commune* and *T. hirsuta* will remain in the stumps of the damaged plants, and b) the fresh cut on the stump of the undamaged plant is a gateway through which the spores of *S. commune* and *T. hirsuta* can enter the plants.

### Conclusion

We observed the growth of and damage to the plants of Paulownia Bellissia® on our agroforestry plantation in the Czech Republic.

The annual height increment of the treated (i.e. irrigated – in periods of drought – and pruned) plants was slightly smaller than is the minimum stated by the seller [5] and the reference (i.e. unirrigated and unpruned) plants had an annual height increment, which was significantly lower (by about 33 %) than that stated by the same seller. The annual thickness increments of the treated and reference plants were smaller than that stated by the seller [5] but greater than that in Bulgaria [18].

The two factors which affected the growth of the plants were drought and pruning. Regarding drought, we measured evident differences between the treated and reference plants, where the treated plants grew more. The smaller growth of the reference plants was caused by less precipitation throughout the vegetation period (i.e. 55 mm vs. the 150 mm recommended by TGG [48]) and, therefore, when we compared the treated and reference plants, we found out that the height and thickness

increment was greater due to irrigation. The other factor, pruning, positively affected the increment of the plants. On the other hand, after the branches were removed, the stem was exposed to the sun and, successively, sunscalded. We were led to this conclusion by the fact that more than 80 % of the treated plants were sunscalded, while all the reference plants remained undamaged. Subsequently, the occurrence of the fruiting bodies of the wood-decaying fungi *Schizophyllum commune* and *Trametes hirsuta*, were noted on most of the sunscalded plants. These fungi are typical wound parasites of broadleaved species. Individuals affected by fungal pathogens will die, and their wood will become worthless due to decay.

It is possible to assume that the vegetation regeneration of all plants will be problematic. If the stump is left untreated, there is a high risk (according to the sources, from 64 to 100 %) that it will be a gateway for spores of fungal pathogens [43, 52, 53, 58], as a result of which the newly growing plants will die in the following years [13, 44, 52].

It is therefore necessary to protect the pruned plants from sunscald (for example by white painting) and treat all the major cut wounds (after the removal of thicker branches, especially those on the stumps) with a tree balm or a resin-based product, which reduces the amount of vapour from the wounds and, also, their primary permeability, thus preventing the entry of fungal pathogens [14].

#### REFERENCES

1. *Agro-Ecological Farming Systems in China*. Ed. by L. Wenhua. Casterton Hall, The Parthenon Publishing Group Limited, 2001. 433 p.
2. Akyildiz M.H., Kol S.H. Some Technological Properties and Uses of Paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) Wood. *Journal of Environmental Biology*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 351–355.
3. *ASUNION. Sve o Paulowniji Bellissia* = ASUNION. All about Paulownia Bellissia. 2021. Available at: [asunion.rs](http://asunion.rs) (accessed: 28.12.23). (In Serb.).
4. BIO TREE. Paulownia. 2021. Available at: [paulowniatrees.eu](http://paulowniatrees.eu) (accessed: 28.12.23).
5. BIO TREE. Bio Tree Paulownia Hybrid. Characteristics and Requirements. Cultivar BELLISSIA. 2020. Available at: [paulowniatrees.eu](http://paulowniatrees.eu) (accessed: 28.12.23).
6. Bodnar A., Pajor F., Steier J., Kispal T., Poti P. Nutritive Value of Paulownia (*Paulownia* spp.) Hybrid Tree Leaves. *Hungarian Agricultural Research*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 27–32.
7. Boháčová M., Gáper J. Rozšíření, Ekologie a Význam Klanolístky Obecné *Schizophyllum commune* ve Vybraných Městech Východních Čech = Distribution, Ecology and Importance of *Schizophyllum commune* in Chosen Towns in East Bohemia. *Východočeský Sborník Přírodovědný – Práce a Studie*, 2011, vol. 18, pp. 113–124. (In Czech).
8. CHMI. Historical Data – Weather – Historical Data. 2022. Available at: [chmi.cz](http://chmi.cz) (accessed: 28.12.23). (In Czech).
9. Clatterbuck W.K., Hodges D.G. *Tree Crops for Marginal Farmland. Paulownia*. Knoxville, the University of Tennessee Extension Service, 2004. 32 p.
10. Čermák P., Palovčíková D., Beránek J., Martínek P. *Atlas Poškození Dřevin. Lesnická a Dřevařská Fakulty Mendelovy Univerzity v Brně* = Atlas of Tree Damage. Faculty of Forestry and Wood Technology of the Mendel University in Brno. Available at: <https://rumex.mendelu.cz/atlasposkozenidrevin> (accessed: 28.12.23). (In Czech).
11. Černý A. *Lesnická Fytopatologie* = Forestry Phytopathology. Praha, Státní Zemědělské Nakladatelství, 1976. 347 p. (In Czech).
12. ČSPA. *Co je to Agrolesnictví?* = ČSPA. What is it Agroforestry? 2019. Available at: <https://agrolesnictvi.cz/co-to-je-agrolesnictvi/> (accessed: 28.12.23). (In Czech).
13. Dimitri L. Die Wundfäule nach Baumverletzungen in der Forstwirtschaft: Entstehung, Bedeutung und die Möglichkeiten der Verhütung = Wound Rot after Tree Damages

in Forestry: Origin, Significance, and Possibilities of Prevention. *Forstwissenschaftliches Centralblatt = European Journal of Forest Research*, 1983, vol. 102, pp. 68–79. <https://doi.org/10.1007/BF02741840> (In German).

14. Fuka P. Řez Břízy = Cut of Birch. Ed. by H. Prknová. *Bříza – strom roku 2010. Sborník příspěvků z konference*. Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze, 2010, p. 37–41. (In Czech).

15. Funk D.T. Stem Form Response to Repeated Pruning of Young Black Walnut Trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 1979, vol. 9, no. 1, pp. 114–116. <https://doi.org/10.1139/x79-019>

16. García-Morote F.A., López-Serrano F.R., Martínez-García E., Andrés-Abellán M., Dadi T., Candel D., Rubio E., Lucas-Borja M.E. Stem Biomass Production of *Paulownia elongata* × *P. fortunei* under Low Irrigation in a Semi-Arid Environment. *Forests*, 2014, vol. 5, no. 10, pp. 2505–2520. <https://doi.org/10.3390/f5102505>

17. Görner T. Planting of Paulownia for Energy Purposes. *Ochrana Přírody*, 2017, vol. 3, pp. 23–24.

18. Gyuleva V., Stankova T., Zhiyanski M., Andonova E. Five Years Growth of *Paulownia* on Two Sites in Bulgaria. *Nauka za Gorata = Forest Science*, 2021, no. 1, pp. 11–22.

19. Hall T. Paulownia: An Agroforestry Gem. *Trees for Life Journal*, 2008, vol. 3:3. <http://www.TFLJournal.org/article.php/20080418100402327>

20. Holec J., Bielich A., Beran M. *Přehled Hub Střední Evropy = Overview of the Mushrooms of Central Europe*. Praha, Academia, 2012. 624 p.

21. Icka P., Damo R., Icka E. Paulownia Tomentosa, a Fast Growing Timber. *The Annals of “Valahia” University of Târgoviște – Agriculture*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 14–19, ref. no. 18.

22. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. World Soil Resources Reports no. 106. Rome, FAO, 2015. 203 p.

23. Jabłoński D. Surowiec Drzewny. *Oxytree: Drewno do Przerobu w Tartaku w 6 Lat od Posadzenia Drzewa = Wood Raw Material. Oxytree: Wood for Processing in a Sawmill 6 Years after Planting the Tree*. 2016. Available at: [drewno.pl](http://drewno.pl) (accessed: 28.12.23). (In Pol.).

24. Jančařík V. Korní Nekrózy Buku = Beech Necrosis. *Lesnická Práce*, 2000, vol. 79, pp. 314–316. (In Czech).

25. Kays J., Johnson D., Stringer J. How to Produce and Market Paulownia. 1997. Available at: [paulowniatrees.org](http://paulowniatrees.org) (accessed: 28.12.23).

26. Kolařík J. *Péče o Dřeviny Rostoucí mimo Les = Caring for Woody Plants Growing outside the Forest*. Vlašim, ČSOP, 2010. 744 p. (In Czech).

27. Köppen W., Geiger R. *Das Geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie = The Geographical System of Climates. Handbook of Climatology*. Berlin, Gebrüder Borntraeger, 1936. 44 p. (In Germ.).

28. Kotlaba F. *Zeměpisné Rozšíření a Ekologie Chorošů (Polyporales s.l.) v Československu = Geographical Distribution and Ecology of Pathogens (Polyporales s.l.) in Czechoslovakia*. Praha, Academia, 1984. 194 p. (In Czech).

29. *Lesy Hlavního Města Praha. Nátěrem proti Korní Spále: Dva Buky ve Stromovce Dostaly Speciální Ochranu = Forests of the Capital City of Prague. Coating against Root Blight: Two Beech Trees in Stromovka Received Special Protection*. 2018. Available at: [lhmp.cz](http://lhmp.cz) (accessed: 28.12.23). (In Czech).

30. Mařová M., Jankovič J., Sujová K., Longauerová V., Mútnánová M. Paulownia – Potenciál a Riziká Pestovania na Slovensku = Paulownia – Potential and Risks of Cultivation in Slovakia. Ed. by A. Kunca, J. Varínský, P. Hlaváč. *Aktuálne Problémy v Ochrane Lesa, 2016. Zborník Referátov z 25. Ročníka Medzinárodnej Konferencie, 21–22.01.2016, Nový Smokovec. Zvolen. Národné Lesnícke Centrum vo Zvolene*, 2016, pp. 87–95. (In Slovak).

31. Missouri Department of Conservation. Turkey Tail Mushroom. 2022. Available at: <https://mdc.mo.gov/discover-nature/field-guide/turkey-tail> (accessed: 28.12.23).

32. Martiník A., Čížková L., Ehrenbergerová L., Jelínek P., Kadavý J., Křen J., Romero V., Šťastná M., Weger J. *Agrolesnictví Skriptum pro Posluchače MENDELU = Agroforestry Script for MENDELU Students*. Brno, MENDELU, 2013. 108 p. (In Czech).

33. Martiník A. et al. *Když se Řekne Agrolesnictví: Didaktická Pomůcka – Stručně a Přehledně o Agrolesnictví* = When it Comes to Agroforestry: Didactic Aid – Concise and Transparent about Agroforestry. Brno, Mendelova Univerzita, 2020. 66 p. (In Czech).
34. Milenković I., Tomšovský M., Karadžić D., Veselinović M. Decline of *Paulownia tomentosa* Caused by *Trametes hirsuta* in Serbia. *Forest Pathology*, 2018, vol. 48, iss. 4, art. no. e12438. <https://doi.org/10.1111/efp.12438>
35. Neilsen W.A., Pinkard E.A. Developing Silvicultural Regimes for Sawlog and Veneer Production from Temperate Eucalypt Plantations in Tasmania. *The Future of Eucalypts for Wood Products, IUFRO Conference Proceedings (Australia, Launceston, March 19–24)*. Hobart, Forest Industries Association, 2000, pp. 335–342.
36. OXYTREE. *Investice do Budoucnosti!* = OXXYTREE. Investing in the Future! 2016. Available at: <http://oxytree.cz/co-je-oxytree/> (accessed: 28.12.23). (In Czech).
37. Parr C.S., Wilson N., Leary P., Schulz K.S., Lans K., Walley L., Hammock J.A., Goddard A., Rice J., Studer M., Holmes J.T.G., Corrigan R.J. The Encyclopedia of Life v2: Providing Global Access to Knowledge About Life on Earth. *Biodiversity Data Journal*, 2022, vol. 2, art. no. e1079. <https://doi.org/10.3897/BDJ.2.e1079>
38. Paulownia Moravia. Paulownia. 2013. Available at: <https://paulowniamoravia.cz/> (accessed: 28.12.23). (In Czech).
39. PAULOWNIA-SLOVAKIA. *Dôležité Informácie Typoch Paulownie* = PAULOWNIA-SLOVAKIA. Important Information about Paulownia Types. 2018. Available at: [paulownia-slovakia.eu](http://paulownia-slovakia.eu) (accessed: 28.12.23). (In Slovak).
40. PLANTMAPS. International Hardiness Zone Maps. 2023. Available at: <https://www.plantmaps.com/index.php> (accessed: 28.12.23).
41. Polanský B. Pěstění lesů II = Silviculture II. Praha. *Státní Zemědělské Nakladatelství*, 1956. 188 p. (In Czech).
42. Puxeddu M., Marras G., Murino G. *Paulownia* Tree-Planting in Sardinia (Italy) and its Evaluation for Agroforestry Systems and Sustainable Land Use. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2012, vol. B1, pp. 1192–1195.
43. Schumann G., Dimitri L. Wunden und Wundfäulen bei der Buche = Wounds and Wound Rot in Beech. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* = German Journal of Forest Research, 1993, vol. 48, pp. 456–460.
44. Shigo A.L. *Decay and Discoloration Following Logging Wounds on Northern Hardwoods: US Forest Service Research Paper, NE-47*. Upper Darby, PA, Northeastern Forest Experiment Station; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1966. 43 p.
45. Sinclair W.A., Lyon H.H. *Diseases of Trees and Shrubs*. London, Cornell University Press, 2005. 680 p.
46. SORTE. *Odsek za Priznanje Sorti. Registar Priznatih Sorti* = SORTE. Department for Recognition of Varieties. Register of Recognized Varieties. 2021. Available at: <https://sorte.minpolj.gov.rs/taxonomy/term/247> (accessed: 28.12.23). (In Serb.).
47. Takemoto S., Nakamura H., Imamura E.Y., Shimane T. *Schizophyllum commune* as a Ubiquitous Plant Parasite. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2010, vol. 44, iss. 4, pp. 357–364. <https://doi.org/10.6090/jarq.44.357>
48. TGG. Paulownia: Technical Bulletin no. 2. 2011. Available at: [doc.development-durable.org](http://doc.development-durable.org) (accessed: 28.12.23).
49. UCLM. *Badanie Wartości Gospodarczej Odmian (VCU). Testowanie Clon in vitro 112. Hybrid Paulownia elongata × Paulownia fortunei. Sprawozdanie techniczne (Czerwiec 2013)* = UCLM. The Economic Value of Varieties (VCU) Survey. Testing Clone *in vitro* 112. Hybrid Paulownia elongata × Paulownia fortunei. *Technical Report (June 2013)*. 2013. Available at: [oxytree.pl](http://oxytree.pl) (accessed: 28.12.23). (In Pol.).
50. UEWPI. *Doporučená Pravidla pro Měření a Třídění Dříví v ČR* = UEWPI. Recommended Rules for Measuring and Sorting Wood in the Czech Republic. Praha, Lesnická Práce, 2007. 41 p. (In Czech).

51. Úradníček L. Paulovnie plstnatá = Paulownia tomentosa. *Lesnická Práce*, 2013, vol. 5, pp. 36–41. (In Czech).
52. Vasiliauskas R. Damage to Trees due to Forestry Operations and its Pathological Significance in Temperate Forests: a Literature Review. *Forestry*, 2001, vol. 74, iss. 4, pp. 319–336. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.4.319>
53. Vasiliauskas R., Stenlid J. Discoloration Following Bark Stripping Wounds on *Fraxinus excelsior*. *European Journal of Forest Pathology*, 1998, vol. 28, iss. 6, pp. 383–390. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1998.tb01192.x>
54. Van Den Berk. Paulownia tomentosa. 2022. Available at: [vdberk.nl](http://vdberk.nl) (accessed: 28.12.23).
55. Wang Q., Shogren J.F. Characteristics of the Crop-Paulownia System in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, vol. 39, iss. 3–4, pp. 145–152. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90050-L](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90050-L)
56. Waugh G., Yang J.L. Opportunities for Sawn Products from Tasmanian Plantation Eucalypts. *Faces of Farm Forestry. Australia Forest Growers Conference (Australia, Launceston)*, 1994, pp. 215–220.
57. WFB. Species of Paulownia. 2016. Available at: <https://www.chinesepaulownia.com/species-of-paulownia/> (accessed: 28.12.23).
58. White D.A., Kile G.A. Breakdown of Barrier Zones and Prediction of the Spread of Discolouration and Decay Resulting from Stem Wounds in *Eucalyptus regnans* and *E. obliqua*. *European Journal of Forest Pathology*, 1994, vol. 24, iss. 2, pp. 71–78. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1994.tb01060.x>
59. Yin R. Valuing the Impacts of Agroforestry in Northern China. *Valuing Agroforestry Systems. Advances in Agroforestry*, vol. 2. Dordrecht, Springer, 2004, pp. 257–277. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2413-4\\_14](https://doi.org/10.1007/1-4020-2413-4_14)
60. Zhao-Hua Z., Ching-Ju C., Xin-Yu L., Xiong Y.G. Paulownia in China: Cultivation and Utilization. *Asian Network for Biological Sciences, International Development Research Centre*, 1986. 65 p. Available at: <https://paulowniamp.files.wordpress.com/2010/05/paulownia-in-china.pdf> (accessed: 28.12.23).

**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\*231.1:630\*561

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-23-45

## Модель формирования березово-еловых насаждений в условиях южной тайги Русской равнины

А.А. Дерюгин<sup>✉</sup>, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAJ-7600-2021](https://orcid.org/0000-0002-2897-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2897-5841>

Н.А. Рыбакова, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAI-8908-2021](https://orcid.org/0000-0002-4978-9001),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-9001>

Ю.Б. Глазунов, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [J-1298-2016](https://orcid.org/0000-0001-9427-9740),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9427-9740>

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, Одинцовский р-н, Московская обл., Россия, 143030; da45@mail.ru<sup>✉</sup>, 1986620@gmail.com, yu.b.glazuov@mail.ru


Поступила в редакцию 03.03.22 / Одобрена после рецензирования 02.06.22 / Принята к печати 05.06.22

**Аннотация.** Приведены результаты 30-летних исследований формирования и роста березняков с подпологовой популяцией ели в условиях южной тайги Русской равнины. Научные работы выполнены на 19 постоянных пробных площадях, заложенных в репрезентативных для региона кислично-черничных березняках возрастом 15–115 лет с высокими полнотой и производительностью. Насаждения березы на пробных площадях относятся к одному естественному возрастному ряду. Основная часть ели появилась под пологом березняков возрастом до 40 лет. Возрастная структура ели по мере старения березы изменялась от одновозрастной до условно-одновозрастной. На основании изучения динамики численности деревьев, вертикальной структуры древостоев, запаса растущей части и общего запаса стволовой древесины определены возрастные стадии развития популяции ели в березняках возрастом до 120 лет: возобновления, молодняка, жердняка, возмужания. Окончание стадии возмужания приходится на возраст березы 120 лет. При этом средний возраст ели в 1-м и 2-м ярусах равен 90 годам. Продолжительность стадий изменяется от 10 лет (стадия молодняка) до 40 лет (стадия возобновления и возмужания). Для установления времени наступления и окончания других возрастных стадий подпологовой популяции ели необходимы исследования в березняках старше 120 лет. Выполненные работы позволили предложить модель совместного формирования березняков и подпологовой популяции ели, в которой по 10-летним периодам роста березняков для всех элементов древостоя даны основные таксационные характеристики: возраст, число деревьев, сумма поперечного сечения стволов, запас древесины растущей части и отпада, общая производительность. Согласно модели к возрасту березы 120 лет общая производительность модальных насаждений составит около 950 м<sup>3</sup>/га, запас растущей части древостоя – примерно 490 м<sup>3</sup>/га. Доля еловой древесины будет равна 28 %, или около 150 м<sup>3</sup>/га. После распада березняка на его месте может сформироваться низкополнотный ельник III класса бонитета.

**Ключевые слова:** южная тайга, березняки, подпологовая популяция ели, березово-еловое насаждение, рост древостоя, возрастные стадии, модель формирования древостоя

**Для цитирования:** Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б. Модель формирования березово-еловых насаждений в условиях южной тайги Русской равнины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 23–45. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-23-45>

© Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б., 2024

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

Original article

## The Model of Birch-Spruce Plantations Formation in the Conditions of the Russian Plain Southern Taiga

**Anatoliy A. Deryugin** , Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;


ResearcherID: [AAJ-7600-2021](https://orcid.org/0000-0002-2897-5841), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2897-5841>

**Natal'ya A. Rybakova**, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAI-8908-2021](https://orcid.org/0000-0002-4978-9001), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-9001>

**Yurij B. Glazunov**, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [J-1298-2016](https://orcid.org/0000-0001-9427-9740),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9427-9740>

Institute of Forest Science, RAS, ul. Sovetskaya, 21, Uspenskoe, Moscow Region, 143030, Russian Federation; [da45@mail.ru](mailto:da45@mail.ru) , [1986620@gmail.com](mailto:1986620@gmail.com), [yu.b.glazuov@mail.ru](mailto:yu.b.glazuov@mail.ru)

Received on March 3, 2022 / Approved after reviewing on June 2, 2022 / Accepted on June 5, 2022

**Abstract.** The results of 30 years or research on the formation and growth of birch forests from the subcanopy spruce population in the conditions of the Russian Plain southern taiga are presented. The studies have been carried out on 19 permanent sample plots (PSPs). They were laid in regionally representative sorrel-blueberry birch forests aged 15–115 years with high density and productivity. The birch plantations on the PSPs belong to the same natural age series. The majority of spruce trees appeared under the canopy of birch forests up to 40 years old. As the birch trees aged, the age structure of spruce trees changed from even-aged to conditionally even-aged. Based on the study of the dynamics of the number of trees, the vertical structure of stands, the growing stock and the total stem wood stock, the age stages of development of the spruce population in the birch forests up to 120 years old have been determined. They are regeneration, young growth, polewood and maturation. The end of the maturation stage occurs at the birch tree age of 120 years. At the same time, the average spruce tree age in the first and second layers is 90 years. The duration of the stages varies from 10 years (the young growth stage) to 40 years (the regeneration and maturation stages). To determine the time of onset and end of other age stages of the subcanopy spruce population, the studies in birch forests older than 120 years are needed. The work performed has made it possible to propose a model of the joint formation of birch forests and the subcanopy spruce population, in which the main taxation characteristics are given for all elements of the stand: age, number of trees, the sum of the cross-section of the stems, the stock of the growing and dead wood, as well as total productivity. According to the model, by the age of a birch of 120 years, the total productivity of modal plantations will be about 950 m<sup>3</sup>/ha and the growing stock of the stand will be about 490 m<sup>3</sup>/ha. The share of spruce wood will be 28 % or about 150 m<sup>3</sup>/ha. After the birch forest decay, a low-density spruce forest of the 3rd quality class can form in its place.

**Keywords:** southern taiga, birch forests, subcanopy spruce population, birch-spruce plantation, stand growth, age stages, stand formation model

**For citation:** Deryugin A.A., Rybakova N.A., Glazunov Yu.B. The Model of Birch-Spruce Plantations Formation in the Conditions of the Russian Plain Southern Taiga. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 23–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-23-45>

### Введение

В условиях южной тайги березняки – наиболее распространенная лесная растительная формация. Этому способствовали рубки коренных ельников в прошлом и существенное снижение объемов рубок ухода в молодняках





мелколиственных пород в период реформирования системы организации лесного хозяйства. В настоящее время в регионе березняки представлены на 48 % площади, покрытой лесной растительностью. Под пологом значительной части таких древостоев (75 %) есть подрост или тонкомер ели [19], которые могут служить основой для восстановления коренных ельников. Исследования в этом направлении являются вкладом в развитие общей теории смен лесной растительности как основы лесообразовательного процесса [2, 12, 16, 20, 24, 25, 28]. Ряд публикаций, в т. ч. зарубежных [1, 4, 8, 10, 27, 29–32, 37], посвящен изменению состава древостоев – конечному результату смены пород в связи с региональными лесорастительными условиями. Вместе с тем «...проблема конкретных параметров изменений, сути динамики в межсменныe переходы или отрезки времени, изучены и отражены в литературе слабо. Это одна из важнейших и ближайших задач лесоведения...» [24, с. 9].

Существуют различные точки зрения о периоде естественной смены производных мелколиственных древостоев ельниками [1, 2, 7, 10, 20]. Остается недостаточно исследованной специфика совместного онтоценогенеза верхнего яруса мелколиственных пород и подпологовой еловой популяции. В связи с этим актуальными становятся вопросы изучения хода смены листовенного древостоя на еловый, установления продолжительности периода восстановления ельников, составления модели демулационного процесса.

К настоящему времени разработаны разнообразные (имитационные, эмпирические, таблицы хода роста и др.) модели формирования и роста древостоев в нашей стране [3, 5, 6, 11, 13, 15, 18, 23] и за рубежом [30, 33–36]. Изучаемые насаждения входят в число нормальных березово-еловых древостоев северной и средней тайги, для которых составлены таблицы хода роста [14]. Для березняков южной тайги с подпологовой популяцией ели модели формирования и роста отсутствуют.

Цель исследования – разработать эмпирико-статистическую модель формирования модальных древостоев березы с подпологовой популяцией ели. Данная модель даст возможность прогнозировать развитие таких древостоев, управлять демулационным процессом в целях замены мелколиственных лесов (прежде всего березняков) насаждениями хвойных пород. Это достижимо только на основе знаний совместной восстановительно-возрастной динамики производных древостоев и формирующейся в них еловой популяции.

#### *Объекты и методы исследования*

Объект исследования – высокопроизводительные березняки кислично-черничной группы типов леса. При разработке модели использовали материалы 30-летних наблюдений на 19 постоянных пробных площадях (ППП), заложенных Институтом лесоведения РАН (Северная лесная опытная станция) в Рыбинском районе Ярославской области. Возраст исследуемых березняков – 15–115 лет, древостои высокополнотные (средняя полнота – 0,86), продуктивность соответствует I–IIa классам бонитета. Рассматриваемые насаждения являются модальными для региона.

Анализ по методу, разработанному сотрудниками Лесотехнической академии и Ленинградского научно-исследовательского института лесного

хозяйства [17], показал, что березняки на ППП могут быть отнесены к одному естественному возрастному ряду. Почти все фактические значения  $HD$  ( $H, D$  – средние высота, м, и диаметр ствола на высоте 1,3 м, см, для березы), согласно уравнению  $HD = -1,77 + 0,199A_6^{0,87}$  ( $R^2 = 0,95; F_{\text{факт}} = 245,33 > F_{0,05} = 3,25; A_6$  – возраст березы, лет), не выходят за границы 95%-й вероятности, кроме двух случаев, которые были исключены при разработке модели (рис. 1).

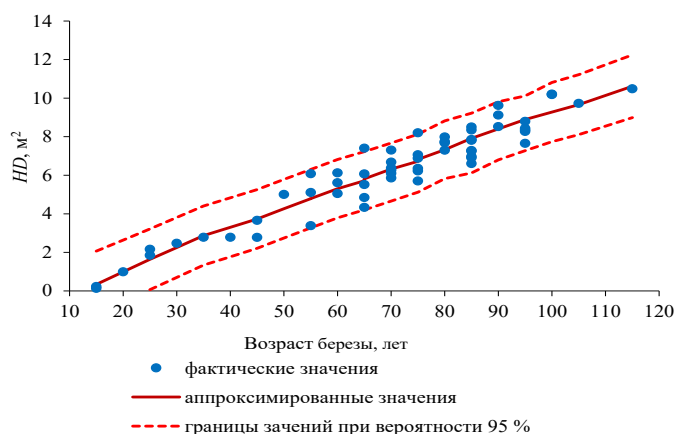


Рис. 1. Обоснование принадлежности насаждений на ППП к одному естественному возрастному ряду

Fig. 1. The justification for the belonging of plantations in the PSPs to one natural age series

При подборе ППП учтены особенности последующего возобновления ели под пологом березняков. Ранее выполненными исследованиями [20] установлено, что березняки подразделяются на фитоценозы с ранним и поздним возобновлением ели. В первых основная часть еловой популяции появляется при возрасте березняка до 40 лет, во вторых – после 40 лет. Первый вариант наиболее распространен в регионе исследования. Именно он рассматривается в разработанной модели.

Принадлежность березняков на ППП к одному возрастному ряду дает возможность адекватно рассматривать возрастную динамику таксационных характеристик древостоев. В составе насаждений доминирует береза повислая (*Betula pendula* Roth), формирующая 1-й ярус древостоя. Во 2-м ярусе представлена преимущественно береза пушистая (*B. pubescens* Ehrh). Небольшое участие в составе 1-го яруса принимает осина (*Populus tremula* L.). Ель европейская (*Picea abies* L.) присутствует во всех ярусах (1-й, 2-й, подрост) насаждений. Деление деревьев по ярусам проводили согласно Лесоустроительной инструкции, утвержденной приказом Минприроды России от 29.03.2018 г. № 122, при этом за нижний порог высоты 1-го яруса принимали среднюю высоту березы. Экстремальные значения основных таксационных характеристик древостоев на ППП приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Экстремальные значения таксационных характеристик древостоев на ППП**  
**The extreme values of taxation characteristics of the stands in the PSPs**

Ярус	Порода	Доля в составе яруса, %	Число деревьев, тыс. шт./га	Средние			Сумма площадей сечения стволов на высоте 1,3 м, м <sup>2</sup> /га	Запас стволовой древесины, м <sup>3</sup> /га
				возраст, лет	высота, м	диаметр ствола на высоте 1,3 м, см		
1-й	Б	56–100	0,17–4,43	15–114	5,8–31,5	3,9–35,3	5,29–30,56	19–392
	Ос	0–44	0–0,39	15–115	4,4–34,2	2,3–43,6	0–10,62	0–158
	Е	0–19	0–0,18	73–97	24,5–26,0	25,9–28,0	0–4,53	0–57
2-й	Б	0–77	0–2,04	26–90	8,6–24,4	5,8–19,1	0–8,77	0–35
	Е	23–100	0,29–1,52	28–93	6,0–16,8	6,6–17,3	1,14–16,62	5–137
Под-рост	Б	0–63	0,02–10,90	15–47	2,6–4,6	–	–	–
	Е	26–100	0,14–5,71	12–83	0,3–6,0	–	–	–

Возрастная структура подпологовой популяции ели с увеличением возраста березняков изменялась от одновозрастной до условно-одновозрастной. На ППП проводили мониторинг характеристик всех деревьев. Обработку результатов осуществляли по принятым в лесной таксации методам. При выделении стадий возрастного развития березняков использовали разработки М.В. Рубцова [20]. Для составления модели применяли метод аппроксимаций фактических данных. Недостающие сведения (для березняков возрастом до 10 лет и 120 лет) были получены экстраполяцией аппроксимированных значений с использованием результатов корреляционного и регрессионного анализа, приведенных в публикации авторов [9].

*Результаты исследования и их обсуждение*

Одним из важных факторов развития популяции на начальных стадиях является ее численность. Для исследуемых насаждений динамику численности подпологовой популяции ели рассматривали на фоне изменения количества доминирующих пород.

Динамика численности осины, наименее представленной в насаждениях, характеризуется нисходящей линией. Густота вида изменяется от 315 шт./га в возрасте 10 лет до 27 шт./га в возрасте 120 лет (рис. 2, а). Отпад деревьев в течение этого времени относительно равномерный. Его доля в 10-летние периоды изменяется в интервале 18–27 %. В данном случае осина не оказывает существенного влияния на развитие популяции ели.

Изменение численности доминирующей в фитоценозе березы можно аппроксимировать гиперболической кривой вида  $y = a + b/x$ .

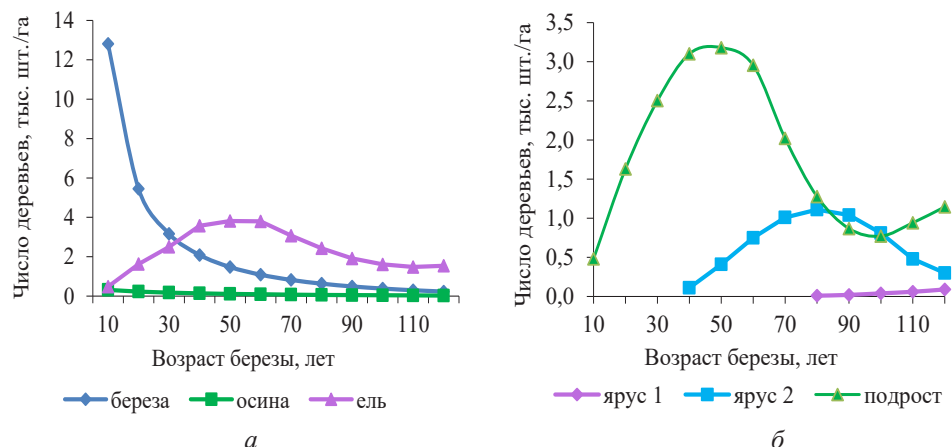


Рис. 2. Динамика общей численности деревьев (а) и численности ели разных ярусов (б)  
 Fig. 2. The dynamics of the total number of trees (а) and the number of spruce trees of different layers (б)

Густота березы характеризуется интенсивным снижением до возраста 30 лет, т. е. до окончания стадии жердняка [20]. В этот период отпадает около 75 % березы, начинается активное возобновление ели (рис. 2, а). За это время численность последней увеличивается в 5,2 раза. В стадии возмужания березняка (возраст 31–50 лет) отпад березы снижается (до 54 %), продолжается повышение количества подпологовой ели (в 1,4 раза в течение стадии). К возрасту березы 50–60 лет численность ели достигает максимума (рис. 2, б). Это 1-е поколение ели с периодом возобновления (разность между возрастaми березы и ели) 1–40 лет.

В последующие восстановительно-возрастные стадии (зрелости и старения) численность березы уменьшается с интенсивностью 22–26 %. Во 2-е десятилетие зрелости березняка начинает снижаться густота ели. В течение этой стадии (51–80 лет) количество подпологовой ели уменьшается на 34 %. Общая численность вида продолжает снижаться в березняках, находящихся в стадии старения. В ее конце в образовавшихся из-за вывалов деревьев березы окнах появляется 2-е поколение ели с периодом возобновления более 40 лет, что приводит к существенному увеличению количества подроста (рис. 2, б). Это отчасти объясняется значительным ростом доли семеносящих деревьев ели 1-го и 2-го ярусов с 4,7 % в березняках в стадии зрелости до 26,6 % в стадии старения [22].

В целом изменение количества подпологовой ели в связи с возрастом березняка может быть описано полиномом вида  $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ .

Изменение численности еловой популяции протекает на фоне изменения ее вертикальной структуры. В березняках возрастом до 40 лет подпологовая популяция представлена исключительно подростом (рис. 2, б). В начале стадии зрелости количество подроста начинает уменьшаться, что связано с процессами отпада и переходом 19 % подроста во 2-й ярус. Подобная динамика, но с меньшей интенсивностью (6–11 %), наблюдается в березняках возрастом до 100 лет. В дальнейшем численность елового подроста увеличивается за счет нового поколения. Возобновление ели в этот период подробно описано в источнике [26].

Интенсивное формирование 2-го яруса ели происходит в березняках, находящихся в стадии зрелости. К концу этой стадии численность яруса становится максимальной (рис. 2, б), небольшая часть деревьев достигает высоты 1-го яруса. С наступлением стадии старения березняка (возраст 80 лет) количество ели 2-го яруса начинает уменьшаться. Это связано, во-первых, с процессами отпада, во-вторых, с отсутствием в подросте деревьев, способных выйти во 2-й ярус и, в-третьих, с переходом незначительного числа деревьев в 1-й ярус. Процесс перехода ели в 1-й ярус протекает очень медленно (рис. 2, б), и к возрасту древостоя 120 лет его численность составляет менее 100 шт./га. Динамика количества ели в ярусах древостоя приведена в табл. 2.

Таблица 2

**Динамика численности подполовой ели (шт./га) по ярусам в зависимости от возраста березняка на ППП**  
**The dynamics of the number of subcanopy spruce trees (pcs./ha) in different layers depending on the age of the birch forest in the PSPs**

Возраст березняка, лет	Подрост				2-й ярус				1-й ярус		
	Растущая часть			Отпад	Растущая часть			Отпад	Растущая часть		
	Сохранилось	Полнение	Итого		Сохранилось	Полнение	Итого		Сохранилось	Полнение	Итого
1–10	–	–	481	194	–	–	–	–	–	–	–
11–20	287	1343	1630	480	–	–	–	–	–	–	–
21–30	1150	1353	2503	735	–	–	–	–	–	–	–
31–40	1298	1803	3101	938	–	–	470	22	–	–	–
41–50	1978	1202	3180	874	448	185	633	37	–	–	–
51–60	2062	893	2855	709	596	244	840	69	–	–	–
61–70	1820	319	2139	600	771	279	1050	133	–	–	–
71–80	1087	416	1503	567	911	239	1144	198	–	–	6
81–90	597	540	1137	434	935	90	1025	233	6	11	17
91–100	297	992	1289	360	774	–	774	219	17	18	35
101–110	104	884	988	150	531	–	531	148	35	24	59
111–120	54	1112	1166	–	352	–	352	–	59	39	90

Описанные процессы оказывают влияние на возрастные характеристики ярусов еловой популяции. Это можно проследить по отношению среднего возраста ели в том или ином ярусе древостоя к возрасту березняка (рис. 3).

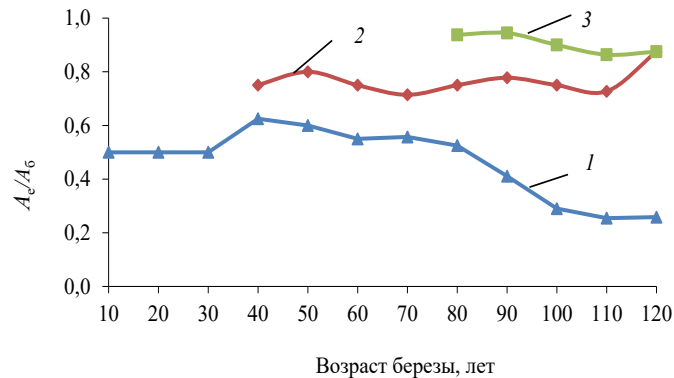


Рис. 3. Динамика отношения возраста ели к возрасту березы ( $A_e/A_b$ ) по ярусам (1 – подрост; 2 – 2-й ярус; 3 – 1-й ярус) в березняках разного возраста

Fig. 3. The dynamics of the spruce age to birch age ratio ( $A_e/A_b$ ) in different layers (1 – ungergrowth; 2 – layer 2; 3 – layer 1) in birch forests of different ages

Для деревьев 1-го яруса это отношение изменяется в интервале 0,86–0,94. Для 2-го яруса в березняке возрастом до 110 лет оно существенно меньше (0,71–80,00) и только в 120-летнем березняке увеличивается до значений 1-го яруса (0,88). Последнее свидетельствует о том, что в формировании 1-го яруса участвуют деревья более старшего возраста.

Для подростка в первые 30 лет отношение возрастов равно 0,50. В 40-летних березняках оно увеличивается до 0,63. В этот период наблюдается сильный отпад подростка, преимущественно среди молодых особей. В березняках 41–80 лет отношение возрастов остается в диапазоне 0,53–0,60. В более старших березняках оно уменьшается до 0,26, что связано с появлением новой генерации ели.

При рассмотрении развития древостоев особое внимание уделяется анализу ростовых процессов [20, 24]. Относительно изучаемых фитоценозов это прежде всего относится к анализу динамики высоты деревьев, определяющей вертикальное строение древостоя, и динамики запаса древесины, которую учитывают при выделении стадий возрастного развития насаждений [20].

Анализ динамики высоты показал, что в березняках до возраста естественной спелости средняя высота старшего возрастного поколения ели остается существенно меньше высоты березы и осины в 1-м ярусе. В 120-летних березняках эта разница составляет 11,4 м: высота березы в 1-м ярусе – 30,7 м, ели старшего возрастного поколения – 19,3 м (рис. 4). Максимальная наблюдаемая высота ели в 120-летних березняках – 29,0 м при возрасте дерева 103 года.

Наибольший текущий среднепериодический прирост в высоту за 10-летний период у березы (62 см/год для 1-го и 40 см/год для 2-го яруса) наблюдается в 20-летнем возрасте, т. е. в конце возрастной стадии молодняка. У осины максимальный прирост в высоту (75 см/год) отмечен уже в 10-летнем возрасте.

По характеру изменения высоты деревьев отличается ель, в популяции которой наблюдается переход деревьев из подростка во 2-й и далее в 1-й ярус. Максимального значения (21 см/год) прирост ели достигает в возрасте 80 лет в березняках, находящихся в стадии старения (110 лет).

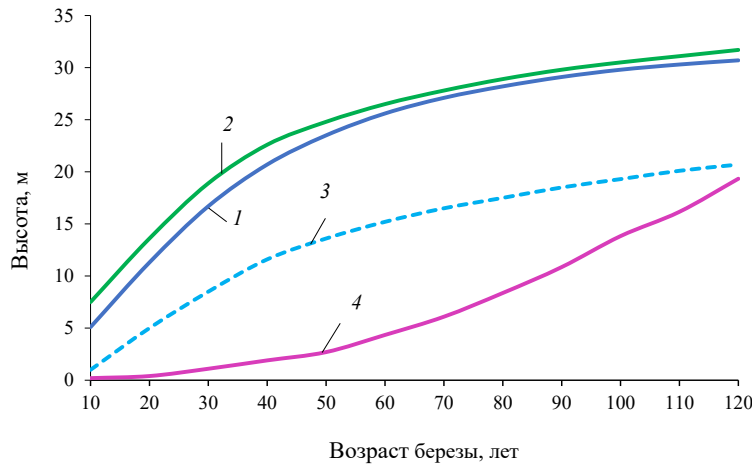


Рис. 4. Динамика высоты деревьев в формирующихся березняках с последующим возобновлением ели: 1 – береза 1-го яруса; 2 – осина; 3 – береза 2-го яруса; 4 – ель 1-го поколения

Fig. 4. The dynamics of tree height in the emerging birch forests with the subsequent spruce regeneration: 1 – birch, layer 1; 2 – aspen; 3 – birch, layer 2; 4 – spruce, the 1st generation

Анализ изменения запаса растущей части древостоя показал, что в рассматриваемых модальных насаждениях запас стволовой древесины березы достигает максимума: в 1-м ярусе ( $330 \text{ м}^3/\text{га}$ ) – в возрасте 90 лет, во 2-м ( $23 \text{ м}^3/\text{га}$ ) – в 40 лет (рис. 5).

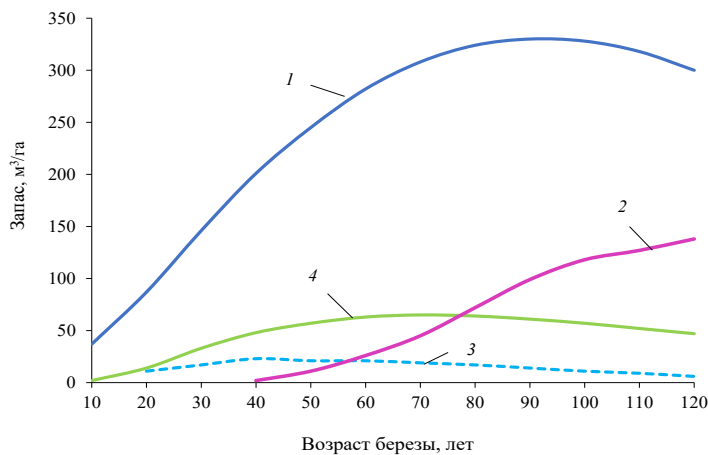


Рис. 5. Динамика запаса древесины растущих деревьев в формирующихся березняках с последующим возобновлением ели: 1 – береза 1-го яруса; 2 – ель 1-го и 2-го ярусов; 3 – береза 2-го яруса; 4 – осина

Fig. 5. The dynamics of growing stock in the emerging birch forests with the subsequent spruce regeneration: 1 – birch, layer 1; 2 – spruce, layers 1 and 2; 3 – birch, layer 2; 4 – aspen

Выявленные тенденции в изменении запаса древесины отличаются от изменений, приведенных в таблицах для нормальных насаждений березы. В них увеличение запаса растущей части древостоя происходит до 120 лет, т. е. до возраста естественной спелости [14]. Для рассматриваемых насаждений начиная с возраста 100 лет данный показатель падает. Если в возрасте 90 лет он равен  $330 \text{ м}^3/\text{га}$ , то к 120 годам уменьшается до  $300 \text{ м}^3/\text{га}$ . Следует отметить, что класс бонитета березняка в возрасте 90 лет снижается с Ia до I. Максимум запаса древесины осины ( $65 \text{ м}^3/\text{га}$ ) приходится на 70 лет при ее участии в составе 1-го яруса 18 %.

Запас ели определяли только для деревьев 2-го и 1-го ярусов в березняках, достигших возраста 40 лет. Изменение запаса древесины ели в рассматриваемом временном интервале протекает иначе, чем у лиственных пород. Показатель постепенно увеличивается и в 120-летних березняках составляет  $138 \text{ м}^3/\text{га}$  при среднем возрасте ели 1-го и 2-го ярусов 90 лет.

Анализ повышения общего запаса древесины показал, что для березы 1-го яруса кульминация среднепериодического прироста наступает в возрасте 30 лет (рис. 6), что совпадает с окончанием интенсивного отпада деревьев и свидетельствует об окончании стадии жердняка [20]. В возрасте около 50 лет береза достигает количественной спелости – наблюдается равенство среднего и среднепериодического приростов стволовой древесины. В этом возрасте для березняков завершается стадия возмужания и они переходят в стадию зрелости, характеризующуюся хорошим семеношением и относительной стабилизацией среднего прироста запаса [20].

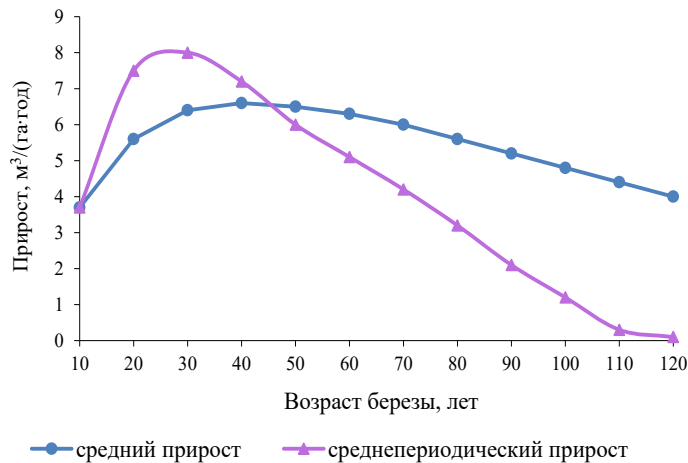


Рис. 6. Динамика среднего и среднепериодического приростов общего запаса стволовой древесины березы 1-го яруса

Fig. 6. The dynamics of average and average periodic increments in the total stem wood stock of birch, layer 1

Анализ дальнейшей динамики прироста показал, что к возрасту 80 лет доля текущего среднепериодического (за 10 лет) изменения запаса достигает 0,5 % (рис. 7). Данное значение принято в качестве показателя окончания стадии зрелости и перехода березняка в стадию старения [20].



В стадии старения завершается процесс роста древостоя, т. е. наступает его естественная спелость. Эта стадия завершается в возрасте 100 лет, когда среднепериодическое изменение запаса переходит в зону отрицательных значений, начинается распад древостоя. Следует отметить, что это же значение возраста отмечается в полных 2-ярусных березово-еловых древостоях с елью последующего возобновления в условиях средней тайги [14].

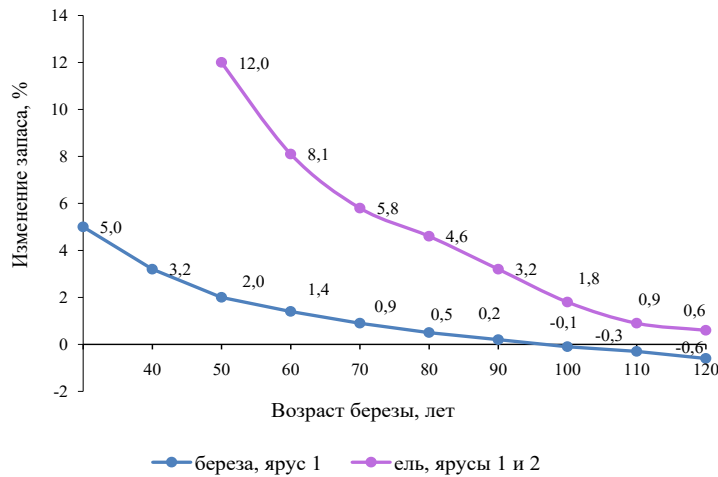


Рис. 7. Изменение текущего среднепериодического запаса стволовой древесины березы и ели

Fig. 7. The change in the current average periodic stock of birch and spruce stemwood

Развитие подпологовой популяции ели существенно отличается от развития этого вида в ельниках, формирующихся без участия мелколиственных пород. Это прежде всего связано с процессами возобновления. Под пологом березняков численность ели увеличивается медленно. Только в 40-летних березняках она достигает более 3 тыс. шт./га. При такой густоте наблюдается смыкание крон и образуется молодняк ели [21]. Это происходит при среднем возрасте ели 30 лет.

Если для ели принять критерии выделения возрастных стадий, рассмотренные для березы, то окажется, что продолжительность стадии молодняк составляет 10 лет и данная стадия завершается при среднем возрасте ели 40 лет и березы – 50 лет. Далее, при среднем возрасте ели 1-го и 2-го ярусов 70 лет в 90-летнем березняке ельник вступает в стадию жердняка, окончание которой характеризуется кульминацией текущего среднепериодического прироста запаса (рис. 8).

После 70 лет ель переходит в стадию возмужания, которая продолжается 20 лет и завершается возрастом количественной спелости при равенстве полных среднего и среднепериодического приростов – средний возраст ели 90 лет, березняка – 120 лет (рис. 8). При этом среднепериодическое изменение запаса древесины у ели, в отличие от березы, остается в области положительных значений.

Используя результаты ранее проведенных исследований по установлению стадий возрастного развития березняков [20] и формирования подпологовой популяции ели, был определен примерный возраст завершения стадий ее развития (табл. 3).

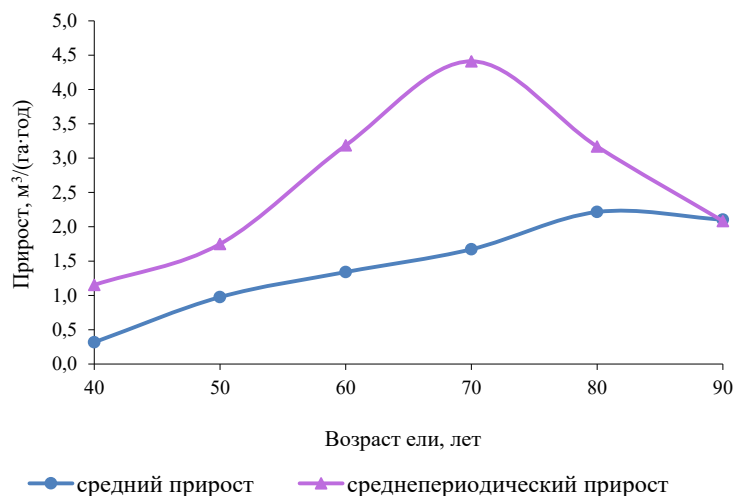


Рис. 8. Динамика среднего и среднепериодического приростов общего запаса стволовой древесины ели 1-го и 2-го ярусов

Fig. 8. The dynamics of the average and average periodic increments in the total stem wood stock of spruce, layers 1 and 2

Таблица 3

**Стадии возрастного развития верхнего яруса древостоев березы Ia–I классов бонитета и подпологовой популяции ели в Центральном районе европейской части России**

**The stages of age development of the upper layer of birch stands of Ia–I quality classes and the subcanopy spruce population in the Central Region of the European part of Russia**

Стадия возрастного развития [24]	Основные признаки стадий возрастного развития [20]	Примерный возраст завершения стадий, лет	
		Береза [20]	Подпологовая ель (средний возраст ели / возраст березы)
Возобновление	Появление всходов и подроста. <i>Образование сомкнутого древостоя (молодняк – «чаща»)</i>	10	30/40
Молодняк	Начало естественного интенсивного изреживания и роста древостоя. <i>Текущее среднепериодическое изменение стволового запаса древостоя превышает 5 %</i>	20	40/50
Жердняк	Интенсивный отпад и рост деревьев. <i>Кульминация полного текущего среднепериодического прироста запаса древостоя</i>	30	70/90

Окончание табл. 3

Стадия возраст-ного развития [24]	Основные признаки стадий возрастного развития [20]	Примерный возраст завершения стадий, лет	
		Бе-реза [20]	Подпологовая ель (средний возраст ели / возраст березы)
Возмужание	Завершение интенсивного отпада деревь-ев, снижение текущего прироста запаса, начало семеношения. <i>Возраст количественной спелости древостоя (равенство полного текущего среднепериодического и общего среднего приростов запаса)</i>	50	90/120
Зрелость	Стабилизация среднего прироста запаса древостоя. <i>Текущее среднепериодическое изменение запаса древостоя не меньше 0,5 %, но не больше показателя в возрасте количественной спелости</i>	80	Не установлено
Старение	Завершение роста. <i>Возраст естественной спелости древостоя (текущее среднепериодическое изменение запаса древостоя равно 0 %)</i>	120	Не установлено

Примечание: Курсивом отмечены принятые критерии завершения стадий.

Исследование проведено в березняках возрастом до 120 лет. Под пологом таких березняков средний возраст ели 1-го и 2-го ярусов достигает 90 лет, что соответствует окончанию стадии возмужания (табл. 3). Для установления возрастных границ стадий зрелости и старения необходимо продолжить исследование в березняках возрастом более 120 лет.

В результате выполненных в течение 30 лет работ на ППП была составлена модель формирования березовых древостоев с подпологовой популяцией ели последующего возобновления (табл. 4).

Разработанная модель, в отличие от существующих таблиц хода роста подобных насаждений для условий северной и средней тайги [14], содержит данные о динамике подроста 2 генераций. Согласно модели, суммарный запас древесины 1-го и 2-го ярусов в 120-летнем березняке составляет около 490 м<sup>3</sup>/га, из которых на долю ели приходится 30 %. Продуктивность березы соответствует I классу бонитета, ели – III, общая полнота древостоя – 1,05, в т. ч. еловой части древостоя – 0,29. Последнее свидетельствует о том, что после распада березняка может сформироваться низкополнотный еловый древостой.





Продолжение табл. 4

Возраст березняка, лет	Ярус	Состав (возраст, лет)	Средние		Общее число деревьев, шт./га	Сумма поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	Растущая часть			Отпад			Общая производительность		
			H, м	D, см			Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост, м <sup>3</sup> /(га·год)	текущее	текущий	Сумма запаса, м <sup>3</sup> /га	Число деревьев, шт./га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост запаса, м <sup>3</sup> /(га·год)	средний
60	1-й	82Б (60)	25,6	20,0	787	24,71	282	4,7	3,7	16	94	232	376	6,3	5,3
		180с (60)	26,5	27,2	92	5,34	63	1,1	0,6	7	18	21	81	1,4	1,3
	2-й	53Е (45)	9,2	9,0	751	4,78	26	0,6	1,5	1	1	37	27	0,6	1,6
		37Б (60)	15,2	11,0	299	2,84	21	0,3	-0,1	10	79	157	100	1,7	0,9
	П <sub>1</sub>	92Е (35)	3,0	-	2708	-	-	-	-	-	-	874	-	-	-
		8Е (10)	0,2	-	247	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	1-й	82Б (70)	27,1	22,9	621	25,56	308	4,4	2,6	16	110	166	418	6,0	4,2
		180с (70)	27,8	29,9	75	5,26	65	0,9	0,2	9	27	17	92	1,3	1,1
	2-й	68Е (50)	10,3	9,9	1009	7,76	45	0,9	2,0	2	3	69	48	1,0	2,2
		32Б (70)	16,5	12,4	200	2,41	19	0,3	-0,2	10	89	99	108	1,5	0,8
	П <sub>1</sub>	84Е (45)	3,6	-	1702	-	-	-	-	-	-	609	-	-	-
		16Е (10)	0,3	-	319	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-

Продолжение табл. 4

Возраст березняка, лет	Ярус	Состав (возраст, лет)	Средние		Общее число деревьев, шт./га	Сумма поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	Растущая часть		Отпад			Общая производительность			
			H, м	D, см			Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост, м <sup>3</sup> /(га·год) среднее	текущее	Запас, м <sup>3</sup> /га	Сумма запаса, м <sup>3</sup> /га	Число деревьев, шт./га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост запаса, м <sup>3</sup> /(га·год) средний	текущий
80	1-й	83Б (80)	28,2	25,8	496	25,92	324	4,1	1,6	16	126	175	439	5,6	3,2
		16Ос (80)	28,9	32,3	61	5,00	64	0,8	-0,1	10	37	14	101	1,3	0,9
		1Е (75)	26,1	24,8	6	0,29	4	-	-	-	-	-	4	-	-
	2-й	77Е (60)	11,4	11,1	1114	10,77	62	1,0	1,7	6	9	133	71	1,2	2,3
		23Б (80)	17,5	13,8	135	2,02	17	0,2	-0,2	9	98	65	115	1,4	0,7
		67Е (55)	4,3	-	861	-	-	-	-	-	-	260	-	-	-
90	1-й	33Е (15)	0,4	-	416	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-
		82Б (90)	29,1	28,6	400	25,68	330	3,7	0,6	15	141	96	471	5,2	2,1
		15Ос (90)	29,8	34,5	50	4,67	61	0,7	-0,2	11	48	11	109	1,2	0,9
	2-й	3Е (85)	27,3	26,0	17	0,90	12	0,1	0,8	-	-	-	12	0,1	0,8
		82Е (70)	12,5	12,5	1043	12,79	87	1,2	2,5	12	21	198	108	1,5	3,7
		18Б (90)	18,5	15,1	90	1,61	14	0,2	-0,3	8	106	44	120	1,3	0,5
	П <sub>1</sub>	38Е (65)	4,9	-	328	-	-	-	-	-	150	-	-	-	-
	П <sub>2</sub>	62Е (20)	0,5	-	540	-	-	-	-	-	167	-	-	-	-

Продолжение табл. 4

Возраст березняка, лет	Ярус	Состав (возраст, лет)	Средние		Общее число деревьев, шт./га	Сумма поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	Растущая часть			Отпад			Общая производительность		
			H, м	D, см			Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост, м <sup>3</sup> (га·год) среднее	текущее	Запас, м <sup>3</sup> /га	Сумма запаса, м <sup>3</sup> /га	Число деревьев, шт./га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост запаса, м <sup>3</sup> (га·год) средний	текущий
100	1-й	81Б (100)	29,8	31,5	322	25,08	328	3,3	-0,2	14	155	78	483	4,8	1,2
		140с (100)	30,5	36,5	41	4,29	57	0,6	-0,4	12	60	9	117	1,2	0,8
	2-й	5Е (90)	24,5	24,9	35	1,70	21	0,2	0,9	-	-	-	21	0,2	0,9
		84Е (75)	14,2	14,2	811	12,84	97	1,3	1,0	13	34	161	131	1,7	2,3
	П <sub>1</sub>	16Б (100)	19,3	16,4	60	1,27	11	0,1	-0,3	8	114	31	125	1,3	0,5
		10Е (70)	5,3	-	76	-	-	-	-	-	-	94	-	-	-
П <sub>2</sub>	90Е (25)	0,6	-	695	-	-	-	-	-	-	134	-	-	-	
110	1-й	78Б (110)	30,3	34,3	259	23,92	318	2,9	-1,0	12	167	63	485	4,4	0,2
		9Е (95)	26,5	24,5	59	2,78	36	0,4	1,5	-	-	-	36	0,4	1,5
	2-й	130с (110)	31,1	38,4	33	3,82	52	0,5	-0,5	13	73	8	125	1,1	0,8
		82Е (80)	16,2	16,9	481	10,78	91	1,1	-0,6	12	46	96	137	1,7	0,6
	П <sub>1</sub>	18Б (110)	20,1	17,6	38	0,92	9	0,1	-0,3	7	121	21	130	1,2	0,4
		6Е (75)	5,6	-	58	-	-	-	-	-	-	63	-	-	-
П <sub>2</sub>	94Е (25)	0,6	-	884	-	-	-	-	-	-	167	-	-	-	



Окончание табл. 4

Возраст березняка, лет	Ярус	Состав (возраст, лет)	Средние		Общее число деревьев, шт./га	Сумма поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	Растущая часть			Отпад			Общая производительность		
			H, м	D, см			Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост, м <sup>3</sup> /(га·год)	текущее	Запас, м <sup>3</sup> /га	Сумма запаса, м <sup>3</sup> /га	Число деревьев, шт./га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Прирост запаса, м <sup>3</sup> /(га·год)	средний
120	1-й	73Б (120)	30,7	37,1	206	22,26	300	2,5	-1,8	18	185	53	485	4,0	0,0
		15Е (100)	27,6	25,8	90	4,70	63	0,6	2,7	-	-	-	63	0,6	2,7
		120с (120)	31,7	40,1	27	3,41	47	0,4	-0,5	14	87	6	134	1,1	0,9
	2-й	84Е (85)	18,4	18,4	300	7,97	75	0,9	-1,6	11	57	59	132	1,6	-0,5
		16Б (120)	20,7	18,9	24	0,67	6	0,1	-0,2	6	123	15	133	1,1	0,4
		3Е (80)	5,6	-	33	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-
П <sub>1</sub>	97Е (30)	0,7	-	1112	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	

Примечание: П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub> – подрост соответственно 1-го и 2-го поколений.

*Заключение*

В результате многолетнего исследования в подзоне южной тайги установлены особенности совместного формирования и роста березы и подпологовой популяции ели. На основании изучения динамики численности деревьев, вертикальной структуры древостоев, запаса растущей части и общего запаса стволовой древесины определены возрастные стадии развития популяции ели. В березняках возрастом до 120 лет для нее выделено 4 возрастные стадии:

возобновление, продолжительность стадии – 40 лет, средний возраст ели – 30 лет;

молодняк, продолжительность стадии – 10 лет, окончание – в возрасте березы 50 лет, средний возраст ели – 40 лет;

жердняк, продолжительность стадии – 30 лет, окончание – в возрасте березы 90 лет, средний возраст ели – 70 лет;

возмужание, продолжительность стадии – 40 лет, окончание – в возрасте березы 120 лет, средний возраст ели – 90 лет.

В целях установления времени наступления и окончания стадий зрелости и старости для подпологовой популяции ели необходимо провести исследования в березняках возрастом более 120 лет.

Составленная модель формирования модальных березняков с подпологовой популяцией ели свидетельствует о том, что на месте березняка после его распада может сформироваться низкополнотный ельник III класса бонитета, с запасом растущей части древостоя менее 150 м<sup>3</sup>/га.

Результаты исследования применимы при разработке мероприятий для кислично-черничных березняков в равнинных условиях южнотаежного лесного района.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абатуров А.В., Меланхолин П.Н.* Естественная динамика леса на постоянных пробных площадях в Подмоскowie. Тула: Гриф и К, 2004. 336 с.  
Abaturov A.V., Melankholin P.N. *Natural Dynamics of the Forest on Permanent Sample Plots in the Moscow Region*. Tula, Grif and K. Publ., 2004. 336 p. (In Russ.).
2. *Белов С.В.* Лесоводство. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 352 с.  
Belov S.V. *Silviculture*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 352 p.
3. *Березовская Ф.С., Карев Г.П., Швиденко А.З.* Моделирование динамики древостоев: Эколого-физиологический подход. М.: ВНИИЦлесресурс, 1991. 84 с.  
Berezovskaya F.S., Karev G.P., Shvidenko A.Z. *Modeling the Dynamics of Forest Stands: Ecological and Physiological Approach*. Moscow, All-Russian Research Centre Lesresurs, 1991. 84 p. (In Russ.).
4. *Бельков В.А.* Модель развития елово-широколиственного леса на примере брянского лесного массива // Лесоведение. 2010. № 3. С. 32–41.  
Bel'kov V.A. A Development Model for Spruce-Broad-Leaved Forest (the Watershed Part of the Bryansk Forest as an Example). *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2010, no. 3, pp. 32–41. (In Russ.).
5. *Брацун Д.А., Колесников А.К., Люшин А.В., Шкараба Е.М.* Моделирование пространственно-временной динамики лесного массива // Вестн. Перм. ун-та. Математика. Механика. Информатика. 2009. Вып. 3(29). С. 24–31.  
Bratsun D.A., Kolesnikov A.K., Lyushnin A.V., Shkaraba E.M. Modeling the Spatio-temporal Dynamics of a Forest Area. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika*.

*Informatika* = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science, 2009, iss. 3(29), pp. 24–31. (In Russ.).

6. Грабарник П.Я., Шанин В.Н., Чертов О.Г., Припутина И.В., Быховец С.С., Петропавловский Б.С., Фролов П.В., Зубкова Е.В., Шашков М.П., Фролова Г.Г. Моделирование динамики лесных экосистем как инструмент прогнозирования и управления лесами // Лесоведение. 2019. № 6. С. 488–500.

Grabarnik P.Ya., Shanin V.N., Chertov O.G., Pripulina I.V., Bykhovets S.S., Petro-pavlovskii B.S., Frolov P.V., Zubkova E.V., Shashkov M.P., Frolova G.G. Modeling of Forest Ecosystem Dynamics: an Instrument for Forest Prediction and Management. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 488–500. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819030033>

7. Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России). СПб.: СПбГЛТА, 2001. 185 с.

Gryazkin A.V. *Regeneration Potential of Taiga Forests (by the Example of Spruce Forests of Northwest Russia)*. St. Petersburg, Ministry of Education of the Russian Federation, St. Petersburg State Forestry Engineering Academy, 2001. 185 p. (In Russ.).

8. Дебков Н.М., Грязькин А.В., Ковалев Н.В. Состояние предварительного возобновления под пологом березняков средней тайги в условиях Томской области // Леса России и хоз-во в них. 2015. № 1(52). С. 24–32.

Debkov N.M., Gryazkin A.V., Kovalev N.V. The State of Regeneration under the Canopy of Birch Forests in the Middle Taiga Conditions of Tomsk Region. *Леса России и хоз-во в них* = Forests of Russia and Economy in Them, 2015, no. 1(52), pp. 24–32. (In Russ.).

9. Дерюгин А.А., Глазунов Ю.Б. Функциональные связи морфометрических характеристик деревьев ели подпологовой популяции в березняках южной тайги // Лесохоз. информ. 2021. № 2. С. 20–28.

Deryugin A.A., Glazunov Yu.B. Functional Connections of Morphometric Characteristics of Spruce Trees of the Sub-Canopy Population in Birch Forests of the Southern Taiga. *Лесохозяйственная информация* = Forestry Information, 2021, no. 2, pp. 20–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.2.02>

10. Зарубина Л.В. Состояние естественного возобновления ели в мелколиственных лесах на севере России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 52–65.

Zarubina L.V. Natural Regeneration of Spruce in the Small-Leaved Forests in the North of Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2016, no. 3, pp. 52–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.52>

11. Исаев А.С., Суховольский В.Г., Хлебопрос Р.Г., Бузыкин А.И., Овчинникова Т.М. Моделирование лесообразовательного процесса: феноменологический подход // Лесоведение. 2005. № 1. С. 3–11.

Isaev A.S., Sukhovol'skii V.G., Khlebopros R.G., Buzykin A.I., Ovchinnikova T.M. Modeling of the Forest-Forming Process: Phenomenology Approach. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2005, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.).

12. Колесников Б.П. Генетический этап в лесной типологии и его задачи // Лесоведение. 1974. № 2. С. 3–20.

Kolesnikov B.P. The Genetic Stage in Forest Typology and its Tasks. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1974, no. 2, pp. 3–20. (In Russ.).

13. Комаров А.С. Пространственные индивидуально-ориентированные модели лесных экосистем // Лесоведение. 2010. № 2. С. 60–68.

Komarov A.S. Spatial Individual-Based Models of Forest Ecosystems. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 2, pp. 60–68. (In Russ.).

14. Лесотаксационный справочник для северо-востока европейской части СССР (нормативные материалы для Архангельской, Вологодской областей и Коми АССР) / Арханг. ин-т леса и лесохимии. Архангельск: АИЛиЛХ, 1986. 358 с.

*Forest Taxation Reference Book for the Northeast of the European Part of the USSR (Regulatory Materials for the Arkhangelsk and Vologda Regions, as well as the Komi ASSR)*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forest and Forest Chemistry Institute Publ., 1986. 358 p. (In Russ.).

15. Логофет Д.О. Марковские цепи как модели сукцессии: Новые перспективы классической парадигмы // Лесоведение. 2010. № 2. С. 46–59.

Logofet D.O. Markov Chains as Models of Succession: New Perspectives of the Classical Paradigm. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 2, pp. 46–59. (In Russ.).

16. Манько Ю.И. Лесообразовательный процесс и классификация лесной растительности // Лесоведение. 2004. № 5. С. 3–9.

Man'ko Yu.I. Forest Formation Process and Classifications of Forest Vegetation. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2004, no. 5, pp. 3–9. (In Russ.).

17. Мoiseев В.С., Мошкалева А.Г., Нахабцев И.А. Методика составления таблиц хода роста и динамики товарной структуры модальных насаждений. Л.: Ленингр. лесотехн. акад., 1968. 88 с.

Moiseev V.S., Moshkaleva A.G., Nakhabtsev I.A. *Methodology for Compiling the Tables of Yield and Commodity Structure of Modal Plantings*. Leningrad, Leningrad Forestry Engineering Academy Publ., 1968. 88 p. (In Russ.).

18. Пегов Л.А. Изучение динамики ценопопуляции березы при помощи имитационной модели // Экология популяций: тез. докл. Всесоюз. совещ., Новосибирск, 4–6 окт. 1988 г. М.: АН СССР, 1988. Ч. 2. С. 225–228.

Pegov L.A. Studying the Dynamics of Birch Coenopopulation Using a Simulation Model. *Ecology of Populations: Abstracts of the Reports of the All-Union Conference* (Novosibirsk, October 4–6, 1988). Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1988, part. 2, pp. 225–228. (In Russ.).

19. Писаренко А.И. Лесовосстановление. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 254 с.

Pisarenko A.I. *Reforestation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 254 p. (In Russ.).

20. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Восстановительно-возрастная динамика популяции ели под пологом южно-таежных березняков при демулационном процессе // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент (Памяти А.И. Уткина). М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2009. С. 206–228.

Rubtsov M.V., Deryugin A.A. Recovery-Age Dynamics of the Spruce Population under the Canopy of Southern Taiga Birch Forests during the Demutation Process. *Production Process and Structure of Forest Biogeocenoses: Theory and Experiment (In Memory of A.I. Utkin)*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2009, pp. 206–228. (In Russ.).

21. Рубцов М.В., Рыбакова Н.А. Динамика парцеллярной структуры лесных фитоценозов в процессе восстановления популяции ели в южнотаежных березняках // Лесоведение. 2016. № 5. С. 323–331.

Rubtsov M.V., Rybakova N.A. Dynamics of Parcel Structure of Forest Phytocenoses in Regenerating Spruce Population in Boreal Birch Forests. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2016, no. 5, pp. 323–331. (In Russ.).

22. Рыбакова Н.А., Рубцов М.В. Семеношение ели под пологом южнотаежных березняков // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 1. С. 73–79.

Rybakova N.A., Rubtsov M.V. Seed Production of Spruce under the Canopy of Birch Forest in South Taiga. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 73–79. (In Russ.).

23. Саликов Н.Я. К обоснованию модели роста древостоев // Лесоустройство и лесная таксация: сб. науч. тр. М.: ВНИИЛМ, 1981. С. 48–50.

Salikov N.Ya. On the Justification of a Forest Stand Growth Model. *Forest Management and Forest Taxation: Collection of Scientific Papers*. Moscow, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 1981, pp. 48–50. (In Russ.).

24. Смолоногов Е.П. О лесообразовательном процессе // Лесоведение. 1999. № 3. С. 7–12.

Smolonogov E.P. On the Forest Formation Process. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1999, no. 3, pp. 7–12. (In Russ.).

25. Стороженко В.Г., Быков А.В., Бухарева О.А., Петров А.В. Устойчивость лесов. Теория и практика биогеоценологических исследований. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2018. 171 с.

Storozhenko V.G., Bykov A.V., Bukhareva O.A., Petrov A.V. *Forest Sustainability. Theory and Practice of Biogeocenotic Research*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2018. 171 p. (In Russ.).

26. Татарников Д.В. Текущее возобновление ели в производных южнотаежных фитоценозах в ходе демулационных сукцессий // Хвойные бореал. зоны. 2019. Т. XXXVII, № 6. С. 432–442.

Tatarnikov D.V. Spruce Recruitment in Some Secondary Forests of Southern Taiga at Different Stages of Their Age-Related Dynamic. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2019, vol. XXXVII, no. 6, pp. 432–442. (In Russ.).

27. Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А., Магасумова А.Г. Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 9–23.

Terinov N.N., Andreeva E.M., Zalesov S.V., Luganskiy N.A., Magasumova A.G. Restoration of Spruce Forests: Theory, National Practice and Problem Solving. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 3, pp. 9–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-9-23>

28. Уткин А.И. «Лесообразовательный процесс» – концепция российского лесоведения // Лесоведение. 1999. № 3. С. 13–24.

Utkin A.I. “Forest Formation Process” – the Concept of Russian Forest Science. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1999, no. 3, pp. 13–24. (In Russ.).

29. Hasenauer H. Concepts Within Tree Growth Modeling. *Sustainable Forest Management*, 2006, Springer, chapt. 1, pp. 3–17. [https://doi.org/10.1007/3-540-31304-4\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-31304-4_1)

30. Kubota Y. Spatial Dynamics of Regeneration in a Conifer/Broad-Leaved Forest in Northern Japan. *Journal of Vegetation Science*, 2000, vol. 11, iss. 5, pp. 633–640. <https://doi.org/10.2307/3236570>

31. Laiho O., Pukkala T., Lähde E. Height Increment of Understorey Norway Spruces under Different Tree Canopies. *Forest Ecosystems*, 2014, vol. 1, art. no. 4. <https://doi.org/10.1186/2197-5620-1-4>

32. Lundqvist L., Nilson K. Regeneration Dynamics in an Uneven-Aged Virgin Norway Spruce Forest in Northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2007, vol. 22, iss. 4, pp. 304–309. <https://doi.org/10.1080/02827580701479717>

33. Monserung R.A. Evaluating Forest Models in a Sustainable Forest Management Context. *Forest Biometry, Modelling and Information Sciences*, 2003, vol. 1, pp. 35–47.

34. Peng C., Wen X. Forest Simulation Models. *Computer Applications in Sustainable Forest Management*, 2006, vol. 11, chapt. 6, pp. 101–125. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4387-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4387-1_6)

35. Porté A., Bartelink H.H. Modeling Mixed Forest Growth: A Review of Models for Forest Management. *Ecological Modeling*, 2002, vol. 150, iss. 1–2, pp. 141–188. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00476-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00476-8)

36. Pretzsch H., Block J., Dieler J., Dong P.H., Kohnle U., Nagel J., Spellmann H., Zingg A. Comparison between the Productivity of Pure and Mixed Stands of Norway Spruce and European Beech along an Ecological Gradient. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, art. no. 712. <https://doi.org/10.1051/forest/2010037>

37. Pukkala T., Lähde E., Laiho O. Species Interactions in the Dynamics of Even- and Uneven-Aged Boreal Forests. *Journal of Sustainable Forestry*, 2013, vol. 32, iss. 4, pp. 371–403. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.770766>

**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\*561.24  
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-46-64

### Дендроэкологическое исследование роста осины в условиях Московской области

*Д.Е. Румянцев*<sup>✉</sup>, *д-р биол. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAJ-7093-2021](https://orcid.org/0000-0001-9871-9504)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9871-9504>*

*Н.С. Воробьева, аспирант*; *ResearcherID: [KDN-7096-2024](https://orcid.org/0009-0008-9911-0045)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9911-0045>*

Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; dendro@mgul.ac.ru<sup>✉</sup>, soln.natashenka@yandex.ru

*Поступила в редакцию 26.09.22 / Одобрена после рецензирования 22.12.22 / Принята к печати 23.12.22*

**Аннотация.** Согласно концепции В.А. Драгавцева, реакция годичного кольца на провокационный экологический фон разных лет создает «портрет» адаптивных полигенных систем генотипа. Сопоставляя реакции основных лесообразующих пород из экологически однородного местообитания, возможно давать оценки уровню сходства их экологических свойств. Кластерный анализ древесно-кольцевых хронологий осины и произрастающих с ней видов, корреляционный анализ хронологий, индексированных хронологий и временных рядов метеофакторов, спектральный анализ Фурье были использованы для дендроэкологического исследования особенностей роста осины в условиях Молокчинского ботанико-энтомологического заказника Сергиево-Посадского района Московской области. Для сравнения с хронологиями осины из 2 древостоев были применены хронологии березы повислой, дуба черешчатого, ольхи серой и ели европейской. Установлено, что кластерный анализ индексированных хронологий на основе расчета квадрата евклидова расстояния и объединения хронологий в группы по правилу полного сцепления выделяет хронологии осины в отдельный кластер, сильно отстоящий от остальных рассматриваемых пород. По данным корреляционного анализа индексированных хронологий, динамика радиального прироста осины наиболее тесно связана с динамикой радиального прироста березы повислой и ольхи серой. При этом максимальный коэффициент корреляции (0,71) наблюдается для хронологий осины из 2 разных древостоев. Среди климатических факторов основное лимитирующее влияние на прирост осины оказывают осадки июля в год формирования годичного кольца и осадки августа в год, предшествующий году формирования годичного кольца. Реакция на осадки августа прошлого года специфична для древостоев осины и имеет несколько вариантов экофизиологической интерпретации. По данным спектрального анализа Фурье, хронологии осины имеют наиболее четко выраженную циклическую компоненту с периодом 10,4 года, что полностью совпадает с циклической компонентой временного ряда чисел Вольфа на рассматриваемом временном интервале. Это выделяет осину среди остальных исследованных лесообразующих пород. Сделано заключение о специфичности динамики радиального прироста осины по сравнению с другими лесообразующими породами.

**Ключевые слова:** дендрохронологическая информация, дендроклиматический анализ, кластерный анализ, анализ Фурье, осина, лесообразующие виды, Молокчинский ботанико-энтомологический заказник

**Для цитирования:** Румянцев Д.Е., Воробьева Н.С. Дендрэкологическое исследование роста осины в условиях Московской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 46–64. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-46-64>

Original article

## Dendroecological Research into Aspen Growth in the Conditions of the Moscow Region

**Denis E. Rumyantsev**<sup>✉</sup>, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AAJ-7093-2021](https://orcid.org/0000-0001-9871-9504),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9871-9504>

**Nataliya S. Vorob'yeva**, Postgraduate Student; ResearcherID: [KDN-7096-2024](https://orcid.org/0009-0008-9911-0045),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9911-0045>

Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; [dendro@mgul.ac.ru](mailto:dendro@mgul.ac.ru)<sup>✉</sup>, [soln.natashenka@yandex.ru](mailto:soln.natashenka@yandex.ru)

Received on September 26, 2022 / Approved after reviewing on December 22, 2022 / Accepted on December 23, 2022

**Abstract.** According to V.A. Dragavtsev's concept, the reaction of the annual ring to the provocative environmental background of different years creates a “portrait” of adaptive polygenic genotype systems. By comparing the reactions of the main forest-forming species from an ecologically homogeneous habitat, it is possible to assess the level of similarity of their ecological properties. Cluster analysis of tree-ring chronologies of aspen and species growing together with it, correlation analysis of chronologies and indexed chronologies, as well as time series of meteorological factors and Fourier spectral analysis have been used for a dendroecological research into aspen growth features in the conditions of the Molokchinskiy Botanical and Entomological Reserve of the Sergiev Posad District of the Moscow Region. To compare with the chronologies of aspen from two stands, the chronologies of European white birch, English oak, grey alder and Norway spruce have been used. It has been established that the cluster analysis of indexed chronologies based on calculating the squared Euclidean distance and combining the chronologies into groups according to the rule of complete linkage distinguishes aspen chronologies into a separate cluster, very distant from the other species under consideration. According to the correlation analysis of indexed chronologies, the dynamics of radial increment of aspen is most closely related to the dynamics of radial increment of European white birch and gray alder. Moreover, the maximum correlation coefficient (0.71) is observed for the chronologies of aspen from two different stands. Among the climatic factors, the main limiting influence on aspen increment is exerted by July precipitation in the year of the annual ring formation and August precipitation in the year preceding the year of the annual ring formation. The response to precipitation in August last year is specific to aspen stands and has several options for ecophysiological interpretation. According to Fourier spectral analysis, aspen chronologies have the most pronounced cyclic component with a period of 10.4 years,

which completely coincides with the cyclic component of the time series of Wolf numbers in the time interval under consideration. This distinguishes aspen from the rest of the studied forest-forming species. A conclusion has been made about the specificity of the dynamics of the radial growth of aspen in comparison with other forest-forming species under study.

**Keywords:** dendrochronological data, dendroclimatic analysis, cluster analysis, Fourier analysis, aspen, forest-forming species, Molokchinskiy Botanical and Entomological Reserve

**For citation:** Rumyantsev D.E., Vorob'yeva N.S. Dendroecological Research into Aspen Growth in the Conditions of the Moscow Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 46–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-46-64>

### *Введение*

В рамках концепции эколого-генетического контроля организации сложных полигенных количественных признаков растений, сформулированной В.А. Драгавцевым [1–6], утверждается, что спектр изменений индексов радиального прироста по годам характеризует наследственные экологические свойства генотипа. Подобного рода методический взгляд широко апробирован в наших предыдущих работах [12–14].

Целью данного исследования было выявление специфики формирования погодичной динамики радиального прироста осины как характеристики ее специфичных наследственных экологических свойств. Для достижения данной цели необходимо вести анализ динамики прироста осины в сопоставлении с приростом других автохтонных лесообразующих пород, произрастающих в унифицированных лесорастительных условиях.

### *Объекты и методы исследования*

Объектом нашего исследования стал Государственный природный заказник областного значения «Молокчинский ботанико-энтомологический заказник». Он находится в Сергиево-Посадском районе Московской области.

В 2016–2018 гг. на территории заказника проводился отбор кернов древесины с основных лесообразующих пород. Временные пробные площади были заложены в пределах таксационного выдела (для одного вида) и не имели четких границ. В живом напочвенном покрове пробных площадей преобладала кислица обыкновенная, а также произрастал комплекс видов, типичных для кисличного типа леса. Подлесок был составлен рябиной обыкновенной, лещиной обыкновенной, бересклетом бородавчатым и жимолостью лесной. Подрост – преимущественно ель и осина, изредка встречались дуб черешчатый и клен остролистный.

Отбор образцов древесины производился с помощью бурава Пресслера на высоте 1,3 м с 15 случайным образом взятых учетных деревьев I–III классов Крафта, по 1 керну с каждого дерева. Таксационные показатели деревьев приведены в табл. 1.



Таблица 1

Средние характеристики 15 учетных деревьев  
The average characteristics of 15 census trees

Вид*	Диаметр, см	Высота, м	Класс возраста
Ель европейская	46	29	VI
Дуб черешчатый	42	30	IV
Береза повислая	34	27	IX
Ольха серая	22	18	VII
Осина 1 (древостой с гнилью)	30	28	VII
Осина 2 (древостой без гнили)	28	23	VI

\*Далее в таблицах и на рисунках – ель, дуб, береза, ольха, осина 1, осина 2.

Для измерения образцов древесины их поверхность специальным образом обрабатывалась: керн смачивался водой, зачищался лезвием бритвы и натирался порошком мела. Затем проводилось определение ширины годичных колец с помощью прибора «Линтаб» в полуавтоматическом режиме. Для контроля за правильностью измерений использовалась перекрестная датировка в программе TSAP-Win. После датировки файл сохранялся в формате, пригодном для работы в программе Microsoft Excel, при помощи которой выполнены основные расчеты.

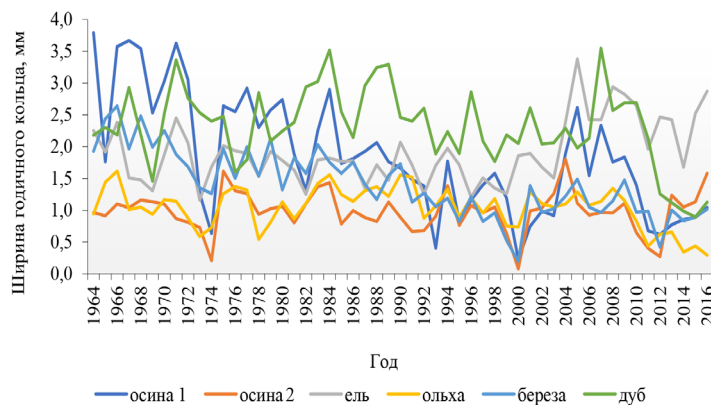
Кластерный анализ и анализ Фурье проведены в программе Statistica 13.0 [16]. Для дендроклиматического анализа были использованы данные метеостанции Москвы: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/27612.htm>.

Результаты исследования и их обсуждение

Все полученные хронологии имели разную длину, общий временной интервал для них составил 1964–2016 гг. Хронологии по средней ширине годичного кольца отражает рис. 1.

Рис. 1. Динамика абсолютной ширины годичного кольца учетных деревьев на пробных площадях

Fig. 1. The dynamics of the absolute width of the annual ring of census trees in the sample plots



В виде, представленном на рис. 1, хронологии мало подходят для сопоставления и дают немного информации для анализа. Они явно отличаются по средней ширине годичного кольца, однако, учитывая фактор возрастного тренда и разную длину хронологий (разный возраст учетных деревьев), этот показатель малоинформативен. Обращает на себя внимание наличие 2 ярко выраженных лет

с формированием экстремально узких годовичных колец: 1974 и 2000 гг. Однако они прослеживаются не у всех видов и четко заметны только для ольхи, осины и березы. Вероятно, это эффект от воздействия листогрызущих вредителей.

Сходство хронологий на данном этапе возможно попытаться оценить методом корреляционного анализа (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между хронологиями по ширине годовичного кольца для 15 учетных деревьев**  
**The correlation coefficients between chronologies by the annual ring width for 15 census trees**

	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
Ель	1,00					
Дуб	-0,18	1,00				
Береза	-0,05	0,29	1,00			
Ольха	0	0,49	0,46	1,00		
Осина 1	0,11	0,36	0,77	0,42	1,00	
Осина 2	0,15	-0,04	0,38	0,30	0,38	1,00

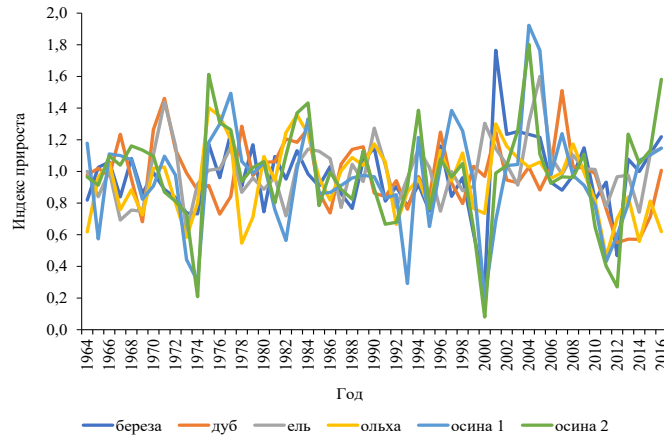
Полученные сведения не поддаются внятной интерпретации с точки зрения оценки сходства по наследственным экологическим свойствам. Наличие 2 хронологий по осине является четким инструментом контроля в наших выкладках: сходство между ними должно быть максимальным по сравнению со сходством хронологии осины с хронологией любого другого вида. Здесь этого не наблюдается, что биологически объяснимо, т. к. превалирующий вклад в коэффициент корреляции вносят долговременные тенденции изменчивости дерева (эндогенные и фитоценотически обусловленные). В целом используемый метод дает ценную информацию, полученные нами на данном этапе результаты сопоставимы по методологии с результатами работ авторского коллектива под руководством А.Н. Соболева [15]. К сожалению, отличия по спектрам изученных видов не позволяют провести более конкретных сравнений.

Выполнялась индексация рядов радиального прироста: ширина годовичного кольца каждого года делилась на среднюю ширину годовичного кольца за последние 5 лет. На основе индивидуальных индексированных хронологий рассчитывалась средняя индексированная хронология древостоя. Результаты расчетов отражают графики на рис. 2.

При анализе индексированных хронологий четко просматривается экстремально низкий радиальный прирост в 2000 г. в хронологиях осины и березы, а также осины в 1974 г. Таким образом, результаты совпадают с результатами анализа неиндексированных хронологий. Полученные данные имеет смысл связывать с объединением листогрызущими вредителями вследствие вспышки их массового размножения. В качестве вероятного вредителя в 2000 г. можно назвать непарного шелкопряда. В этом году все листовые породы, кроме ели, демонстрировали пониженный прирост, что косвенно подтверждает предположение. В 1999–2000 гг. вспышка численности названного вредителя наблюдалась, например, в Мордовском заповеднике.

Рис. 2. Динамика индексов радиального прироста учетных деревьев

Fig. 2. The dynamics of radial increment indices in the census trees



Сравнение сходства видов по наследственным экологическим свойствам возможно провести методом корреляционного анализа индексированных хронологий (табл. 3).

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции между индексированными хронологиями 15 учетных деревьев**

**The correlation coefficients between the indexed chronologies of 15 census trees**

	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
Ель	1,00					
Дуб	0,10	1,00				
Береза	0,18	0,12	1,00			
Ольха	0,31	0,28	0,44	1,00		
Осина 1	0,38	0,15	0,42	0,34	1,00	
Осина 2	0,14	0,13	0,65	0,46	0,71	1,00

Анализируя данные табл. 3, в первую очередь следует отметить, что хронологии осины демонстрируют между собой максимальное сходство, что является надежным маркером биологической интерпретируемости полученных коэффициентов. Достаточно высоко взаимное сходство в группе «осина, береза, ольха».

При кластерном анализе были использованы 2 метода расчета кладиограммы: расчет простого евклидова расстояния и объединение по правилу простого сцепления (вариант 1 – рис. 3); расчет квадрата евклидова расстояния и объединение по правилу сложного сцепления (вариант 2 – рис. 4).

Из рис. 3 видно, что данные по березе и ольхе серой оказываются близки, что можно объяснить как их систематическим статусом (семейство березовых), так и сходными лесоводственными свойствами. Дуб наименее похож на все остальные породы, что также ожидаемо. Однако в этой кладиограмме отсутствует выбранный нами за основу критерий – максимальное сходство (близость) хронологий осины.

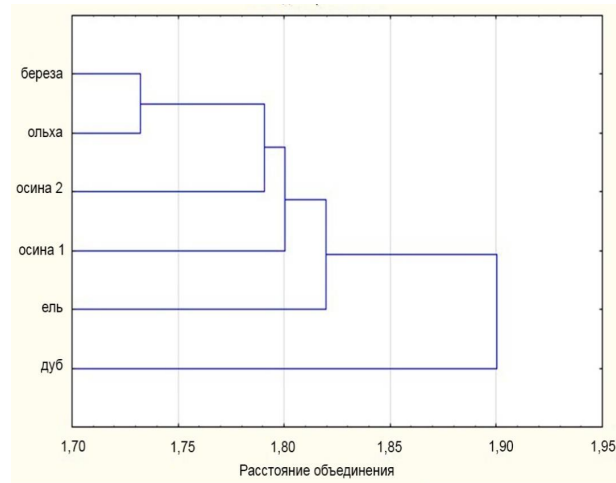


Рис. 3. Результаты кластерного анализа по варианту 1  
Fig. 3. The results of cluster analysis for option 1

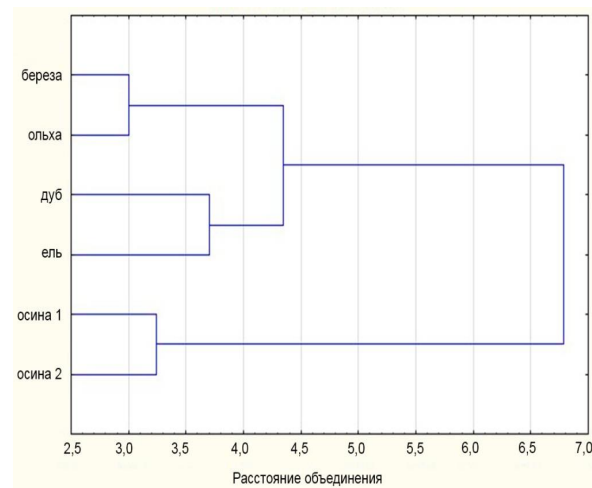


Рис. 4. Результаты кластерного анализа по варианту 2  
Fig. 4. The results of cluster analysis for option 2

Результаты кластеризации по варианту 2 отвечают выбранному нами критерию: хронологии осины оказываются максимально близки между собой. Аналогичны по степени близости береза и ольха, а также дуб и ель. Характерно, что хронологии осины наиболее удалены от всех остальных пород: они образуют равнозначный кластер с группой «дуб, ель, ольха, береза». Это свидетельствует об уникальных наследственных экологических свойствах осины.

Таким образом, наша исходная предпосылка заключается в том, что ряды радиального прироста несут в себе генетическую компоненту. Оценивая их сходство, можно определить наследственные экологические свойства (адаптивных полигенных систем, в терминологии В.А. Драгавцева). Очевидно, что сходство рядов может быть оценено по-разному и такие оценки дадут разные результаты. В своем исследовании мы использовали хронологии по абсолютной ширине годичного кольца и индексированные хронологии, сходство между которыми выявляли методами корреляционного и кластерного анализа. Основным критерием, определяющим по тем ли компонентам ведется оценка сходства, было наличие максимальной связи между 2 хронологиями осины в сравнении с основной группой, включающей в себя ель, дуб, березу и ольху. Установлено, что корреляционный анализ индексированных хронологий

дает результаты, близкие к тому, как мы себе представляем оценку сходства по адаптивным полигенным системам. Хронологии березы, осины и ольхи демонстрируют значительный уровень сопряженности.

Кластерный анализ по варианту 2 выносит хронологии осины в отдельный уникальный кластер. Это согласуется с общими представлениями об уникальности данной древесной породы. В отличие от всех остальных, она размножается преимущественно вегетативно, что ведет к высокому единообразию генетического материала в ценопопуляции, кроме того, даже между взрослыми растениями сохраняется связь через корни и обмен пластическими веществами. В каком-то смысле древостой осины на локальном участке представляет собой локальный суперорганизм, что, видимо, позволяет ему специфически реагировать на смену погодных условий от вегетационного сезона к вегетационному сезону и обеспечивает особый характер временной изменчивости годичных колец, непохожий на характер изменчивости годичных колец у иных лесообразующих видов.

Для лучшего понимания специфики погодичной изменчивости осины необходимо выполнить дендроклиматический анализ [18, 24]. Для этого возможно провести корреляционный анализ между индексированными хронологиями и рядами метеопараметров (среднемесячная температура, °С; месячная сумма осадков, мм). Результаты расчетов представлены в табл. 4. При числе степеней свободы 65 и уровне доверительной вероятности 0,05 достоверны коэффициенты от 0,24 и выше.

Таблица 4

**Коэффициенты корреляции между индексами прироста и метеопараметрами в год формирования годичного кольца и в год, предшествовавший этому процессу, для 15 учетных деревьев**  
**The correlation coefficients between growth indices and meteorological parameters in the year of the annual ring formation and in the year preceding this process for 15 census trees**

Месяц	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
<i>Год формирования годичного кольца:</i>						
<i>Индекс прироста и температура</i>						
Январь	0,23	-0,12	0,13	-0,06	<b>0,25</b>	0,07
Февраль	0,10	-0,18	0,19	0,03	<b>0,26</b>	0,21
Март	0,13	-0,05	0,15	0,15	0,13	0,08
Апрель	0,14	-0,18	0,13	-0,08	0,06	-0,05
Май	-0,09	-0,03	0,01	-0,14	-0,06	-0,10
Июнь	-0,11	-0,10	0,14	-0,05	-0,02	0,09
Июль	<b>-0,26</b>	-0,22	0,13	<b>-0,27</b>	-0,01	0,03
Август	-0,11	0,06	-0,12	-0,21	-0,03	-0,04
Сентябрь	-0,03	0,07	0,06	-0,15	<b>0,24</b>	0,20
Октябрь	-0,08	0,04	0,02	-0,09	0,02	0,04
Ноябрь	-0,03	-0,10	0,03	-0,13	-0,04	-0,08
Декабрь	0,05	-0,09	0,12	0,06	<b>0,32</b>	0,18

Окончание табл. 4

Месяц	Ель	Дуб	Береза	Ольха	Осина 1	Осина 2
<i>Индекс прироста и осадки</i>						
Январь	<b>0,36</b>	0,10	0,10	0,16	0,23	0,10
Февраль	0,15	0,07	0,15	-0,09	0,08	0,08
Март	0,07	-0,09	0,00	-0,03	0,11	0,15
Апрель	0,15	0,05	0,05	0,23	-0,05	-0,05
Май	0,15	-0,17	0,02	-0,06	0,02	0,08
Июнь	0,17	-0,09	-0,14	-0,12	-0,14	-0,23
Июль	<b>0,25</b>	0,02	0,10	0,15	<b>0,27</b>	<b>0,25</b>
Август	0,02	0,05	0,27	<b>0,25</b>	0,06	<b>0,25</b>
Сентябрь	-0,12	-0,13	-0,06	-0,08	-0,14	-0,07
Октябрь	0,02	0,08	-0,15	0,05	0,04	-0,06
Ноябрь	-0,04	0,06	-0,09	-0,10	0,02	0,01
Декабрь	0,00	-0,12	0,00	0,06	0,00	0,01
<i>Год, предшествовавший формированию годичного кольца:</i>						
<i>Индекс прироста и температура</i>						
Январь	0,14	-0,09	-0,04	-0,08	0,08	-0,03
Февраль	0,09	-0,16	0,21	-0,05	0,16	0,18
Март	<b>0,35</b>	-0,10	0,16	0,18	0,14	0,15
Апрель	-0,14	-0,09	-0,03	-0,16	-0,13	-0,04
Май	-0,09	-0,20	-0,21	-0,23	-0,23	-0,19
Июнь	-0,06	-0,17	-0,03	-0,03	0,11	0,06
Июль	0,02	<b>-0,34</b>	0,01	-0,04	0,09	0,05
Август	0,07	-0,03	0,11	0,01	0,00	0,02
Сентябрь	0,16	0,10	-0,14	-0,16	0,01	-0,19
Октябрь	0,22	0,10	-0,05	-0,05	0,00	-0,11
Ноябрь	-0,06	-0,10	-0,15	-0,16	-0,10	-0,12
Декабрь	-0,04	0,00	-0,05	-0,08	0,21	0,03
<i>Индекс прироста и осадки</i>						
Январь	0,14	-0,02	0,15	0,06	0,04	0,03
Февраль	-0,12	-0,06	0,09	-0,05	-0,11	0,04
Март	-0,09	0,12	-0,03	-0,06	0,00	0,10
Апрель	0,07	0,11	0,09	-0,01	0,08	-0,01
Май	-0,14	0,06	0,06	-0,12	0,03	0,07
Июнь	0,05	0,06	0,15	-0,13	-0,11	-0,06
Июль	0,02	0,05	0,07	-0,11	0,03	0,02
Август	-0,01	0,08	0,17	0,17	<b>0,36</b>	<b>0,29</b>
Сентябрь	-0,07	-0,18	-0,10	-0,16	-0,10	-0,09
Октябрь	0,08	-0,08	0,06	0,14	0,06	0,03
Ноябрь	-0,06	-0,18	-0,01	-0,05	-0,11	-0,09
Декабрь	0,04	0,01	0,18	0,03	0,04	0,04

Примечание: Достоверные значения выделены полужирным шрифтом.

Анализируя данные табл. 4, следует отметить немногочисленность достоверных коэффициентов корреляции и слабую тесноту связи между переменными. С точки зрения классических представлений экологии это объяснимо тем, что рассматриваемые виды произрастают в зоне оптимума, а отклонения отдельных метеопараметров от оптимальных значений вызывают погодичные колебания прироста. Однако каждый год изменяются разные метеопараметры, другими словами, лимитирующие прирост факторы неодинаковы год от года. При таком режиме климатической обусловленности формирования прироста корреляционный анализ не выявит тесных связей, как в случае, когда существует 1–2 лимитирующих прирост фактора, значения которых меняются по годам и определяют характер кратковременной изменчивости радиального прироста. Если сосредоточиться на влиянии климатических условий на прирост осины, то, во-первых, можно отметить, что по параметрам текущего года они имеют существенно отличное распределение коэффициентов корреляции. Это уместно объяснять тем, что хронология (осина 1) построена по деревьям, в значительной степени пораженным осиновым трутовиком, и физиология реакции этого вида на динамику климатических факторов существенным образом модифицирует результирующий итог влияния климатических факторов на колебания ширины годичного кольца. Во-вторых, положительное влияние на прирост осины оказывает повышенное количество осадков в июле в год формирования годичного кольца, при этом связь хотя и достоверна, но характеризуется низкой теснотой. В-третьих, обнаружена связь, специфичная лишь для осины (для обоих древостоев): положительная реакция прироста на увеличение количества осадков в августе в год, предшествовавший году формирования годичного кольца. Эта связь может иметь несколько вариантов экофизиологической интерпретации.

Таким образом, результаты кластерного анализа нашли подтверждение при дендроклиматическом анализе. Имеет смысл сопоставить их с данными других авторов. Для осины обыкновенной сравнительных данных практически нет, но для близкого по систематике вида (легко вступающего с осиной обыкновенной в гибридизацию) – осины американской (*P. tremuloides* Michx) – существует значительный объем опубликованных результатов дендрэкологических исследований на основе анализа годичных колец.

Исследования осины (*P. tremuloides* Michx.) в западной Канаде показали корреляцию между прошлыми событиями дефолиации насекомыми и образованием узких, аномально бледных колец деревьев [20]. Результаты данных исследований подтверждают обоснованность нашего предположения о наличии массового объедания листвы в Молокчинском заказнике в 2000 г.

Для осиновых лесов Аляски было изучено влияние климата и насекомых-филлофагов на радиальный рост [17]. Авторы обнаружили, что урожайность древесины снижалась с увеличением количества поврежденных листьев и не была чувствительна к наличию влаги в вегетационный период. Продуктивность снижалась в годы с высоким уровнем повреждения листвы, но затем восстанавливалась до значений перед вспышкой, в годы низкого повреждения насекомыми, что свидетельствует о высокой степени устойчивости осины к повреждению листьев вредителем *Phyllocnistis populiella*. В целом полученные авторами результаты указывают на то, что косвенные последствия распространения минера имеют большее влияние на продуктивность и физиологию осины.

ны, чем климат (в нынешних условиях), и этот факт необходимо учитывать при оценке роста, физиологии и прогнозе продуктивности осиновых лесов во внутренних районах Аляски. В контексте нашей работы важно, что в данном исследовании зафиксировано воздействие на прирост осины не только листогрызущих насекомых, но и насекомых, вызывающих минирование. До последнего времени уровень реального влияния насекомых-минеров на прирост древесных растений оставался дискуссионным.

Таким образом, закономерности развития локальной популяции осинового минера (в наших условиях это *Phytagromyza tridentata*), влияние климатических факторов на ее параметры будут оказывать действие на динамику радиального прироста осины. Возможно, часть короткопериодических составляющих в хронологиях осины формируется под воздействием флуктуаций плотности популяции осинового минера, этим же можно объяснить влияние ряда факторов, которые могут определять успешность зимовки вредителя, за пределами вегетационного сезона. Важно также, что, как и в нашем случае, в рассматриваемом исследовании установлено, что осадки в течение вегетационного сезона не оказывают выраженного действия на радиальный прирост по годам.

Дендроклиматический анализ роста гибридов осины был проведен учеными из Латвии [23]. Полученные данные в целом не противоречат нашим результатам.

Коллективом канадских ученых выполнена комплексная оценка взаимосвязи между ростом деревьев и климатом [22]. Для этой цели использовались измерения дендрометром. В масштабах внутригодового времени результаты показывают, что осадки, вероятно, являются основным фактором изменения радиуса ствола. Высокие температуры воздуха оказывали немедленное негативное влияние на содержание воды в стеблях из-за транспирации. Это было наиболее заметно в периоды снижения доступности влаги в корневой зоне, когда деревья более восприимчивы к потере чистого объема воды. Для периодов, в которые влажность не являлась ограничителем, была обнаружена положительная взаимосвязь между запаздывающей температурой воздуха и изменением радиуса ствола. Таким образом, повышенные температуры воздуха могут играть важную роль в стимулировании радиального роста при соблюдении требований к влажности.

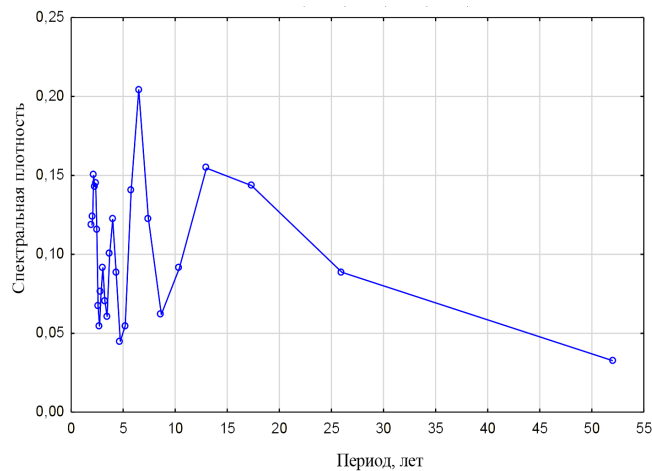
Данные обзора литературы указывают на значимость дендроклиматических исследований роста древесных пород для мониторинга их состояния и прогнозирования изменений продуктивности.

Прирост древесных растений умеренных широт характеризуется циклической колебательностью [7, 11, 19, 21]. Существенным дополнением к анализу специфики формирования радиального прироста осины служат результаты исследования циклической его колебательности на основе метода Фурье. Анализ Фурье позволяет получить объективные данные о наличии циклических компонент в рядах радиального прироста, даже когда при визуальном анализе рядов радиального прироста такая циклическая просматривается. Результаты анализа для исследуемых хронологий отражают графики спектральной плотности на рис. 5–10. Число наблюдений на рис. 5–11 – 52; веса Хемминга – ,0357; ,2411; ,4464; ,2411; ,0357.



Рис. 5. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя березы в Молокчинском заказнике

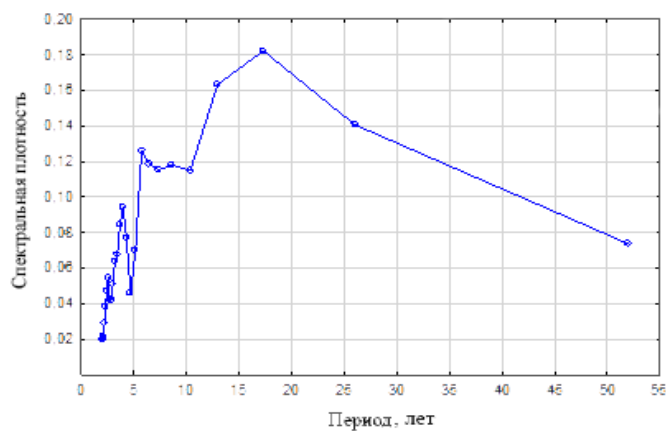
Fig. 5. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the birch stand in the Molokchinskiy Reserve



Спектрограмма для древостоя березы имеет несколько выраженных пиков, демонстрируя наличие циклических компонент с длиной цикла 13; 6,5; 4; 3,05 и 2,1 года. Наибольшей выраженностью обладает компонента с циклическостью 6,5 года, т. е. приблизительно 1/2 типичного солнечного цикла. Компонента с 13-летним периодом близка по значениям к условно 11-летней компоненте солнечного цикла – циклу Швабе. Цикл Швабе является одним из наиболее часто проявляющихся в изменчивости прироста древесных пород [7, 19]. Не исключено, что циклы 4; 3,05 и 2,1 года обусловлены эндогенными причинами функционирования организма деревьев (например, обилием плодоношения, которое у древесных пород обладает определенной периодичностью). Для березы повислой в условиях южной тайги циклическая компонента плодоношения оценивается в 1,2 года [8], что с биологической точки зрения может соответствовать только 2 годам, т. к. сезонные процессы вегетации дискретны и биологически осмысленная циклическость в их оценке возможна только с точностью до 1 года. Особенности плодоношения березы таковы, что после определенного порогового предела в плодоношении наблюдатель будет приписывать оценке плодоношения один и тот же, наивысший балл. Таким образом, некоторые компоненты циклическости в плодоношении березы могут ускользать из анализа в балльных временных рядах оценки интенсивности ее плодоношения.

Рис. 6. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя дуба в Молокчинском заказнике

Fig. 6. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the oak stand in the Molokchinskiy Reserve



В спектрограмме дуба четко выражена циклическая компонента длиной 17 лет. Важно и, по-видимому, биологически значимо, что такая же по циклу компонента (17,03 года) четко проявляется и в спектрограмме ели (рис. 7). Также обнаружены компоненты: с периодичностью 5,8 года (приблизительно 1/2 11-летнего цикла), которая может быть связана с чередованием в цикле ветвей роста и спада солнечной активности; с периодичностью 4,0 года, предположительно, связанная с плодоношением дуба. Для ранней формы дуба черешчатого в условиях южной тайги приводится периодичность плодоношения 3,9 года, т. е. полностью совпадающая с выявленной нами компонентой в цикличности прироста данного вида в условиях южной тайги [8].

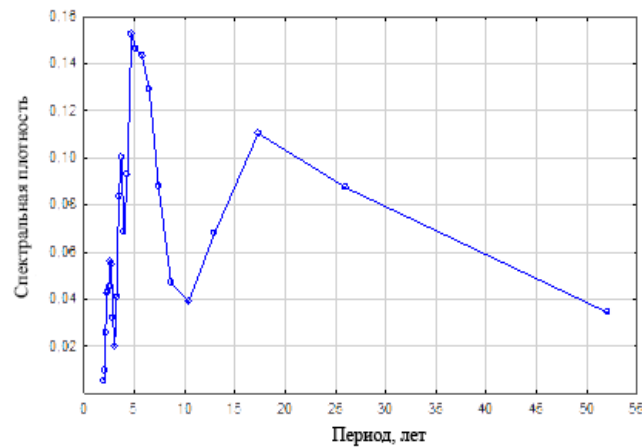


Рис. 7. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя ели в Молокчинском заказнике

Fig. 7. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the spruce stand in the Molokchinskiy Reserve

В спектрограмме для древостоя ели наиболее выражена циклическая компонента с периодом 4,2 года, чуть менее сильно выражена компонента 17,03 года. Компонента 4,2 года может быть увязана с эндогенно обусловленной цикличностью роста и развития дерева. Также присутствуют компоненты с периодом 4,7 и 3,7 года. Они, вероятно, связаны с цикличностью семеношения ели. Есть данные, что в годы обильного семеношения ширина годичного кольца у этого вида снижается на 40 % по сравнению с неурожайными, что объясняется перераспределением продуктов ассимиляции между процессами формирования урожая семян и новых слоев ксилемы [2]. Для ели в южной тайге приводятся данные о цикличности семеношения с периодом 3,9 года [8], что почти совпадает со средним значением между выявленными компонентами (4,2 года).

В динамике радиального прироста ольхи присутствует наиболее четко выраженная циклическая компонента 6,5 года. Эта же компонента наиболее выражена в динамике радиального прироста родственной ольхе и сходной с ней по лесоводственным свойствам березы (рис. 5). Такая динамика близка к 1/2 цикла Швабе, ее возможно трактовать как обусловленную солнечной активностью на ветвях роста и спада в этом цикле. Также присутствует компонента с периодом 3,7 года, объясняемая нами как обусловленная эндогенными процессами в организме дерева и совпадающая с периодичностью плодоношения ели и дуба.

Рис. 8. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя ольхи в Молокчинском заказнике

Fig. 8. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the alder stand in the Molokchinskiy Reserve

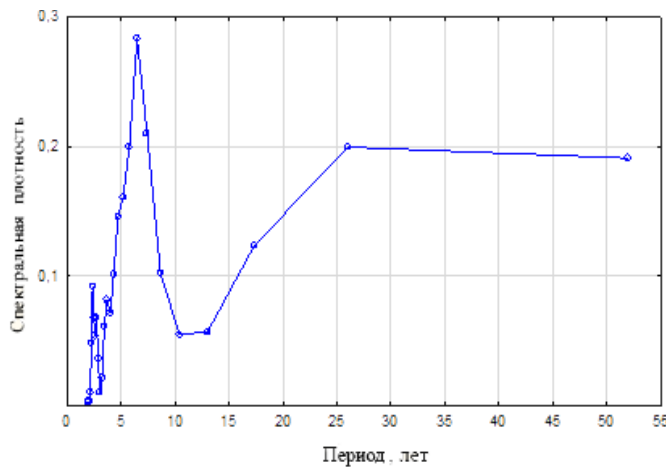
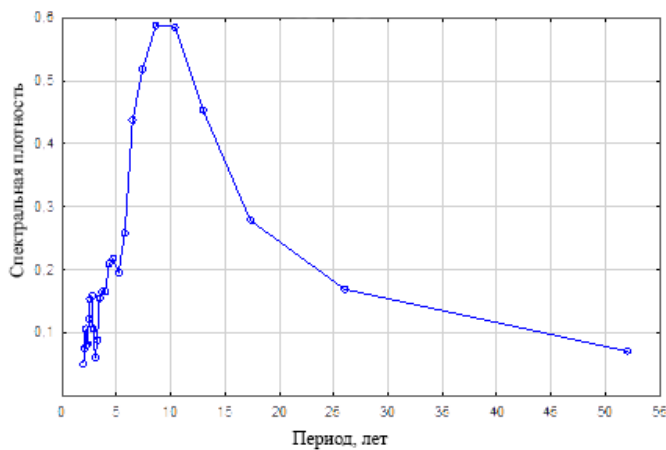


Рис. 9. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя осины (с деревьями, частично пораженными гнилью) в Молокчинском заказнике

Fig. 9. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the aspen stand (with the trees partially affected by rot) in the Molokchinskiy Reserve



Для хронологии древостоя осины, в котором около 50 % деревьев поражено ядровой гнилью, вызываемой осиновым трутовиком, выделяются 2 равные по значимости компоненты – 10,4 и 8,7 года. Первая совпадает с периодичностью цикла Швабе, и – что важно и, по-видимому, биологически не случайно – такая же по периоду компонента (10,4 года) наблюдается и во 2-й хронологии для древостоя осины, среди учетных деревьев которого практически отсутствуют пораженные гнилью (рис. 10). Есть также короткопериодические компоненты с длиной цикла 4,0 и 3,7 года.

На спектрограмме для хронологии, полученной по данным древостоя осины, среди учетных деревьев которого практически отсутствуют пораженные гнилью, читаются 2 примерно равнозначных компоненты (как и в другом древостое осины). Их период составляет 10,4 и 6,5 года. Есть короткопериодическая компонента с длиной цикла 3,7 года.

Для удобства восприятия материала имеет смысл также рассмотреть спектрограмму для временного ряда чисел Вольфа на изучаемом временном интервале (рис. 11).

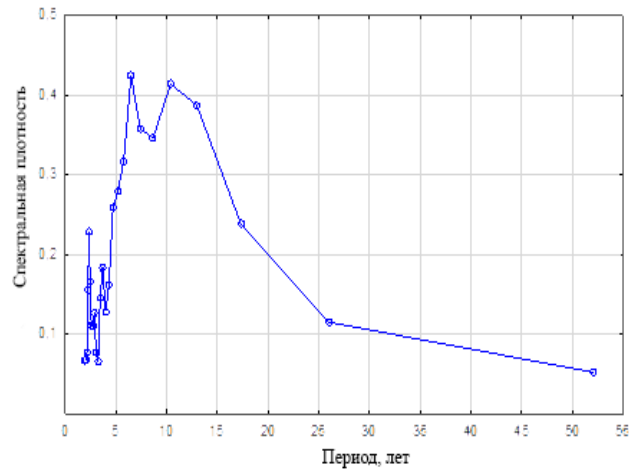


Рис. 10. Результаты спектрального анализа Фурье для хронологии древостоя осины (с деревьями, не пораженными гнилью) в Молокчинском заказнике

Fig. 10. The results of Fourier spectral analysis for the chronology of the aspen stand (with the trees not affected by rot) in the Molokchinskiy Reserve

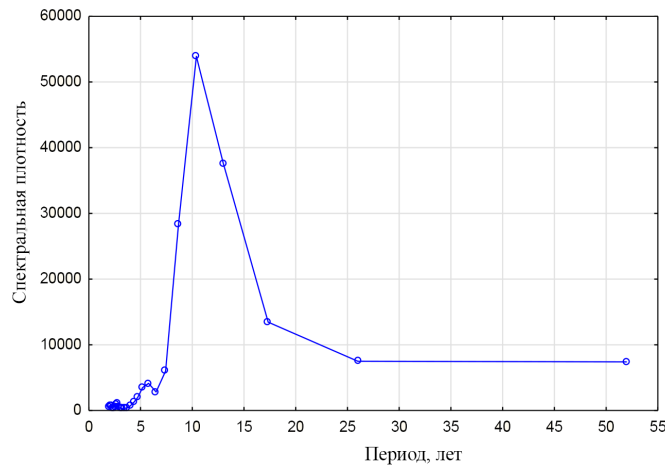


Рис. 11. Результаты спектрального анализа Фурье для ряда чисел Вольфа за период 1964–2016 гг.

Fig. 11. The results of Fourier spectral analysis for the series of Wolf numbers for 1964–2016

Обобщенные данные цикличности динамики прироста для разных хронологий в период 1964–2016 гг. представлены в табл. 5.

Подводя итог, следует сделать ряд обобщений. Во-первых, в динамике прироста разных лет не были выявлены циклические компоненты, превышающие 17 лет. Зафиксированная 17-летняя компонента близка к 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла) [1].

Для древостоев осины обнаружена циклическая компонента (10,4 года), полностью совпадающая с циклическостью чисел Вольфа за рассматриваемый период, что говорит о наиболее ярко выраженном влиянии 11-летнего солнечного цикла на прирост данной породы. Таким образом, результаты кластерного и дендроклиматического анализа совпадают с результатами спектрального анализа Фурье в том аспекте, что изменчивость прироста в древостоях осины специфична по сравнению с другими исследованными лесообразующими породами.

Сходные по лесоводственным свойствам осина и береза демонстрируют наличие циклической компоненты с периодом 6,5 года, что соответствует существованию в пределах цикла Швабе так называемых ветвей солнечной активности (ветви роста и спада активности). Эта же компонента (6,5 года) проявляется в спектрограмме одного из древостоев осины. По-видимому, компоненты с периодом, близким к 5 годам, в хронологиях дуба (5,8 года) и ели (4,7 года) также совпадают с циклом Швабе.

Таблица 5

**Обобщенные результаты анализа Фурье для индексированных хронологий  
изученных лесобразующих пород за период 1964–2016 гг.  
в сравнении с результатами анализа временного ряда чисел Вольфа  
The generalized results of Fourier analysis for indexed chronologies  
of the studied forest-forming species for 1964–2016 in comparison  
with the results of the analysis of the time series of Wolf numbers**

Временной ряд	Период, лет	Спектральная плотность
Ель	17,3	0,11
	4,7	0,15
	5,2	0,15
	3,7	0,10
Дуб	17,3	0,18
	5,8	0,13
	4,0	0,09
Береза	13,0	0,15
	6,5	0,20
	4,0	0,12
	3,1	0,09
	2,1	0,15
Ольха	6,5	0,28
	3,7	0,08
Осина 1	10,4	0,58
	8,7	0,59
	4,0	0,16
	3,7	0,17
Осина 2	10,4	0,41
	6,5	0,42
	3,7	0,17
Число Вольфа	10,4	53 896,17

Есть основания увязывать циклические компоненты с периодичностью 4,0; 3,7; 3,05; 2,01 года с эндогенными физиологическими процессами роста и развития древесных растений. Циклическая компонента 3,7 года выявлена в 4 хронологиях (2 хронологии осины, ольха и ель). Следует добавить, что известный лесовед М.Г. Романовский неоднократно высказывал предположение о том, что короткопериодические составляющие в динамике радиального прироста возникают как автоколебания и только синхронизируются средой [9, 10].

Анализируя выявленную циклическую природу, уместно обратиться к мнению М.Г. Романовского и его соавтора Р.В. Щекалева [11], составивших ряд замечаний по поводу этого процесса, самое важное из которых сводится к тому, что все зависимости опосредованы и размыты из-за индивидуальной и видовой изменчивости, т. к. и виды, и отдельные особи имеют разные пороги мутационно-репарационной активности.

## Заключение

По итогам исследования на основе числовых методов (кластерный анализ, корреляционный анализ, анализ Фурье) была установлена уникальность наследственных экологических свойств осины среди основных лесообразующих пород. Возможно, это следует объяснять как эффект существования локального осинового древостоя в качестве единого суперорганизма, внутри которого между отдельными экземплярами стволов деревьев осуществляется обмен веществом, энергией и фитогормональной информацией. С точки зрения ответа на климатические факторы эта уникальность связана с положительной реакцией на повышенное количество осадков в августе в год, предшествовавший году формирования годичного кольца, и может быть экофизиологически интерпретирована. С учетом результатов гармонического анализа эта специфичность обусловлена наличием в изменчивости прироста осины циклической компоненты с периодом 10,4 года, полностью совпадающей с циклической компонентой временного ряда чисел Вольфа на исследуемом временном интервале. Исходя из полученных данных, осина представляется ценным объектом дендрохронологических исследований, информацию, которую дает анализ ее хронологий, можно использовать для ретроспективной реконструкции экологических изменений среды, не фиксирующихся в изменчивости прироста ели европейской и дуба черешчатого. Данный факт делает актуальным построение долгосрочных хронологий осины, в т. ч. с применением древесины деревянных построек, в которых она хорошо сохраняется.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 192 с.  
Vitinskiy Yu.I. *Solar Activity*. Moscow, Nauka Publ., Chief Editorial Board of Physical and Mathematical Literature, 1983. 192 p. (In Russ.).
2. *Данилов Д.Н.* Влияние плодоношения на структуру годичного слоя у ели (*Picea excelsa* Link.) // Ботан. журн. 1953. Т. 38, № 3. С. 367–377.  
Danilov D.N. The Effect of Fruiting on the Structure of the Spruce (*Picea excelsa* Link.) Annual Ring. *Botanicheskij zhurnal*, 1953, vol. 38, no. 3, pp. 367–377. (In Russ.).
3. *Драгавцев В.А.* Эколого-генетическая модель организации количественных признаков растений // С.-х. биология. 1995. Т. 30, № 5. С. 20–30.  
Dragavtsev V.A. Ecogenetic Organization Model of Quantitative Plant Properties. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* = Agricultural Biology, 1995, vol. 30, no. 5, pp. 20–30. (In Russ.).
4. *Драгавцев В.А.* Идентификация адаптивных полигенных систем у отдельных деревьев популяции хвойных пород // Генетика и селекция на службе лесу: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 28–29 июня 1996 г. Воронеж: НИИЛГИС, 1996. С. 7.  
Dragavtsev V.A. Identification of Adaptive Polygenic Systems in Individual Trees of the Coniferous Population. *Genetics and Breeding at the Service of the Forest: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Practical conference* (Voronezh, June 28–29, 1996). Voronezh, Research Institute of Forest Genetics and Breeding, 1996, p. 7. (In Russ.).
5. *Драгавцев В.А.* Некоторые новые фундаментальные подходы в экологической генетике растений // С.-х. биология. 2000. Т. 35, № 1. С. 34–36.

Dragavtsev V.A. Some New Basic Approaches in Plant Ecological Genetics. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* = Agricultural Biology, 2000, vol. 35, no. 1, pp. 34–36. (In Russ.).

6. Драгавцев В.А. К проблеме генетического анализа полигенных количественных признаков растений. СПб.: ВИР, 2003. 32 с.

Dragavtsev V.A. *On the Problem of Genetic Analysis of Polygenic Quantitative Traits in Plants*. St. Petersburg, All-Russian Institute of Plant Genetic Resources Publ., 2003. 32 p. (In Russ.).

7. Матвеев С.М. Цикличность в динамике радиального прироста естественных и искусственных сосновых древостоев в борах Центральной лесостепи // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 5. С. 110–116.

Matveev S.M. Cyclicity in Radial Growth Dynamics of Natural and Artificial Scotch Pine Stands in Pine Woods of the Central Forest Steppe. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2014, vol. 18, no. 5, pp. 110–116. (In Russ.).

8. Редько Г.И., Мерзленко М.Д., Бабич Н.А. Лесные культуры: в 2 ч. М.: Юрайт, 2019. Ч. 1. 197 с.

Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A. *Forest Cultures*: in 2 parts. Moscow, Yurajt Publ., 2019, part 1. 197 p. (In Russ.).

9. Романовский М.Г. Индивидуальная изменчивость ширины годичных слоев и равнослойность древесины // Вопросы лесовыращивания и рационального лесопользования. М.: МЛТИ, 1983. С. 138–140. (Науч. тр. / МЛТИ; вып. 148).

Romanovsky M.G. Individual Variability of the Width of Annual Rings and Uniformity of Wood. *The Issues of Forest Cultivation and Rational Forest Management*: Collection of Scientific Works of Moscow Forestry Institute. Moscow, Moscow Forestry Institute Publ., 1983, iss. 148, pp. 138–140. (In Russ.).

10. Романовский М.Г. Перспективы моделирования динамики годичного прироста древесных растений как функции абиотических факторов // Рациональное использование и воспроизводство лесных ресурсов. М.: МЛТИ, 1992. С. 72–74. (Науч. тр. / МЛТИ; вып. 256).

Romanovsky M.G. Prospects for Modeling the Dynamics of Annual Growth of Woody Plants as a Function of Abiotic Factors. *Rational Use and Reproduction of Forest Resources*: Collection of Scientific Works of Moscow Forestry Institute. Moscow, Moscow Forestry Institute Publ., 1992, iss. 256, pp. 72–74. (In Russ.).

11. Романовский М.Г., Щекалев Р.В. Лес и климат центральной полосы России. М.: Правда Севера, 2009. 95 с.

Romanovsky M.G., Shchekalev R.V. *Forest and Climate of Central Russia*. Moscow, Pravda Severa Publ., 2009. 95 p. (In Russ.).

12. Румянцев Д.Е. Диагностика экологических требований хвойных интродуцентов на основе дендрохронологической информации // Бюл. ГБС. 2004. Вып. 188. С. 36–40.

Rumyantsev D.E. Diagnostics of Ecological Requirements in Introduced Conifers on the Basis of Dendrochronological Information. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the Main Botanical Garden, 2004, iss. 188, pp. 36–40. (In Russ.).

13. Румянцев Д.Е., Александрова М.С. Дендрохронологическая диагностика отдельных экологических свойств у видов *Picea* // Бюл. ГБС. 2006. Вып. 190. С. 87–93.

Rumyantsev D.E., Alexandrova M.S. Dendrochronological Diagnostics of Individual Ecological Characteristics in the genus *Picea*. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* = Bulletin of the Main Botanical Garden, 2006, iss. 190, pp. 87–93. (In Russ.).

14. Румянцев Д.Е., Мельник П.Г., Александрова М.С. Генотипические компоненты изменчивости величины радиального прироста // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2006. № 5(47). С. 124–128.

Rumyantsev D.E., Melnik P.G., Alexandrova M.S. Genotypic Components of Variability of the Radial Increment. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2006, no. 5(47), pp. 124–128. (In Russ.).

15. Соболев А.Н., Феклистов П.А., Грязькин А.В., Гаевский Н.П., Барзут О.С. Рост древостоев разных пород в одинаковых условиях местопроизрастания на Большом Соловецком острове // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 2. С. 24–30.  
Sobolev A.N., Feklistov P.A., Gryazkin A.V., Gaevsky N.P., Barzut O.S. Multispecies Stands Growth in Similar Growing Conditions on Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 24–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-24-30>
16. Халафян А.А. *Statistica 6. Статистический анализ данных*. М.: Бином-Пресс, 2008. 512 с.  
Khalafyan A.A. *Statistica 6. Statistical Data Analysis*. Moscow, Binom-Press Publ., 2008. 512 p. (In Russ.).
17. Boyd M.A., Berner L.T., Doak P., Goetz S.J., Rogers B.M., Wagner D., Walker X.J., Mack M.C. Impacts of Climate and Insect Herbivory on Productivity and Physiology of Trembling Aspen (*Populus tremuloides*) in Alaskan Boreal Forests. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, art. no. 085010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab215f>
18. Cook E., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V. Tree-Ring Standardization and Growth Trend Estimation. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environment Science*. Springer Science + Business Media Dordrecht, 1992, chapt. 3.3, pp. 104–108.
19. Douglass A.E. *Climatic Cycles and Tree-Growth. A Study of the Annual Rings of Trees in Relation to Climate and Solar Activity*. Washington, Carnegie Institution of Washington, 1919. 127 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.121855>
20. Hogg E.H., Hart M., Liefers V.J. White Tree Rings Formed in Trembling Aspen Saplings Following Experimental Defoliation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 32, no. 11, pp. 1929–1934. <https://doi.org/10.1139/x02-114>
21. Lovelius N.V. *Dendroindication of Natural Processes and Anthropogenic Influences*. St. Petersburg, World & Family-95, 1997. 320 p.
22. Maillet J., Nehemy M.F., Mood B., Pappas C., Bonsal B., Laroque C. A Multi-Scale Dendroclimatological Analysis of Four Common Species in the Southern Canadian Boreal Forest. *Dendrochronologia*, 2022, vol. 72, art. no. 125936. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125936>
23. Šēnhofa S., Zeps M., Matisons R., Smilga J., Lazdina D., Jansons Ā. Effect of Climatic Factors on Tree-Ring Width of *Populus* hybrids in Latvia. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 1, art. no. 1442. <https://doi.org/10.14214/sf.1442>
24. Fritts H.C. *Tree Rings and Climate*. London, New York, San Francisco, Academic Press, 1976. 567 p.

**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 582.632.2:634.0.266

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-65-72

## Рост и состояние дуба черешчатого в смешанных древостоях полезащитных лесных полос

А.С. Чеканышкин, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-4197-2021](https://orcid.org/0000-0002-7848-2818),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7848-2818>

Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева, д. 81, кв-л 5, пос. 2-го участка Института им. В.В. Докучаева, Таловский р-н, Воронежская обл., Россия, 397463; niish1c@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.22 / Одобрена после рецензирования 09.07.22 / Принята к печати 12.07.22

**Аннотация.** Анализ создания и эксплуатации защитных лесных насаждений на сельскохозяйственных предприятиях Центрально-Черноземного района позволяет утверждать, что положительные мелиоративные функции выполняют те лесные насаждения, которые имеют хороший рост, высокую устойчивость и долговечность. Отечественными учеными-лесоведами признано, что главной породой в условиях степи для всех видов защитных лесонасаждений является дуб черешчатый. Цель исследования – оценка современного состояния древостоев полезащитных лесных полос различных способов посадки с главной породой дубом черешчатым. Таксационные работы и лесопатологические обследования проведены в 1997–2021 гг. в полезащитной лесной полосе № 9, созданной весной 1989 г. 2-летними сеянцами на территории землепользования ФГУП ОПХ «Знамя Октября» Таловского района Воронежской области. Установлено, что влияние сочетаний древесных пород в лесных полосах на рост дуба в 32-летнем возрасте довольно значительно. В результате конкурентных взаимоотношений за ресурсы среды со стороны быстрорастущей и сопутствующих пород количество живых дубов в варианте лесной полосы сплошной рядовой посадки меньше на 35,6...52,1 %, чем в вариантах прерывистых лесных полос, от их числа при посадке. Сохранившиеся резко угнетенные дубы в насаждении сплошной рядовой посадки сильно отстают по высоте и диаметру ствола (на 0,8...7,6 м и 4,1...12,7 см соответственно) от дубов в прерывистых лесных полосах блочной посадки. Отсутствие рубок ухода в насаждениях опытных вариантов в период их роста и формирования привело к значительному количеству дубового отпада и нежизнеспособных деревьев данного вида. При этом в варианте лесной полосы сплошной рядовой посадки доля лесного отпада и нежизнеспособных деревьев превышает показатель в вариантах прерывистых лесных полос на 36,6...40,6 %. Количество жизнеспособных дубов в вариантах прерывистых лесных полос больше на 17,7...27,3 %, чем в варианте лесной полосы сплошной рядовой посадки, а ограничено жизнеспособных – на 11,5...18,9 %.

**Ключевые слова:** дуб черешчатый, защитные лесные насаждения, смешанный древостой, способ создания лесных полос, лесопатологическое состояние деревьев

**Для цитирования:** Чеканышкин А.С. Рост и состояние дуба черешчатого в смешанных древостоях полезащитных лесных полос // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 65–72. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-65-72>

Original article

## Growth and Condition of the English Oak in the Mixed Stands of Forest Shelterbelts

*Aleksey S. Chekanyshkin*, Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist;  
ResearcherID: [AAK-4197-2021](https://orcid.org/0000-0002-7848-2818), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7848-2818>

Voronezh Federal Agricultural Scientific Centre named after V.V. Dokuchaev, 81, kv-1 5,  
pos. 2-go uchastka Instituta im. V.V. Dokuchaeva, Talovskiy District, Voronezh Region,  
397463, Russian Federation; niish1c@mail.ru

Received on April 5, 2022 / Approved after reviewing on July 9, 2022 / Accepted on July 12, 2022

**Abstract.** An analysis of the creation and operation of protective forest plantations at agricultural enterprises of the Central Chernozem Region allows us to assert that positive ameliorative functions are performed by those forest plantations that have good growth, high stability and longevity. Russian forestry scientists have recognized that the main species in the steppe conditions for all types of protective forest plantations is the English oak. The aim of the research has been to assess the current state of the stands in forest shelterbelts planted via different methods with the English oak as the main species. Taxation works and forest pathology research were carried out in 1997–2021 in the forest shelterbelt no. 9, established in the spring of 1989 by 2-year-old seedlings in the land-use territory of the Federal State Unitary Enterprise Experimental Production Farm “Znamya Oktyabrya” of the Talovskiy District of the Voronezh Region. It has been established that the influence of combinations of tree species in forest belts on the growth of the English oak at the age of 32 years is quite significant. As a result of competitive relations for environmental resources by fast-growing and associate species, the number of live oak trees in a continuous row planting option is 35.6...52.1 % less than in intermittent forest belt options, of their number during planting. The remaining sharply oppressed oak trees in the plantation sown in the continuous row planting way are far behind in height and stem diameter (by 0.8...7.6 m and 4.1...12.7 cm, respectively) compared to the oaks growing in the intermittent forest belts sown in a block planting way. The absence of improvement felling in the experimental plantations during their growth and formation has led to a significant number of dead oak wood and non-viable trees of this species. Moreover, the proportion of dead oak wood and non-viable trees in the forest belt sown via continuous row planting exceeds the indicator in the intermittent forest belts by 36.6...40.6 %. The number of viable oak trees in the intermittent belt options is 17.7...27.3 % higher than in the continuous row planting option, and the number of limitedly viable trees is 11.5...18.9 % higher.

**Keywords:** English oak, protective forest plantations, mixed stand, method of forest belt creating, forest pathology condition of trees

**For citation:** Chekanyshkin A.S. Growth and Condition of the English Oak in the Mixed Stands of Forest Shelterbelts. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 65–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-65-72>



### *Введение*

В лесоразведении известно несколько способов создания защитных лесных насаждений с различным сочетанием деревьев и кустарников в схемах смешения. Основным считается рядовой способ посадки сеянцев древесных пород и кустарников, т. к. он прост в исполнении и достаточно механизирован. На основе рядовой посадки Ю.В. Ключниковым [5] разработан внедренный в производство коридорный способ выращивания дуба черешчатого. В.Я. Векшегоновым [3] и Е.С. Павловским [8] предложены шахматная и диагонально-групповая посадки древесных растений. Создание лесных полос с применением крупномерного посадочного материала проводилось А.М. Коротуном [6], Н.Г. Петровым [9]. Б.И. Скачковым и А.С. Чеканышкиным [10] разработаны и опробованы в производственных условиях методы создания прерывистых лесных полос. Защитные лесные насаждения исследовались учеными нашей страны и зарубежья [5, 11–23]. Отечественными лесоведами было признано, что главной породой в условиях степи для всех видов защитных лесонасаждений является дуб черешчатый.

Цель исследования – оценка современного состояния древостоев полезащитных лесных полос различных способов посадки с главной породой дубом черешчатым (далее по тексту – дуб).

### *Объекты и методы исследования*

Исследование проведено в 1997–2021 гг. в полезащитной лесной полосе № 9 на территории землепользования ФГУП ОПХ «Знамя Октября» Таловского района Воронежской области. Насаждение создано 2-летними сеянцами весной 1989 г. Ширина лесной полосы – 10,0 м. Размещение сеянцев в ряду на расстоянии один от другого – 0,7...1,0 м, промежуток между рядами – 2,5 м. Число посадочных мест – 4667 шт./га. Участие дуба в составе насаждений (вариантов опыта) при посадке – 50 %.

Стационарный опыт включает следующие варианты: 1) контроль – сплошная рядовая посадка дуба (Д) в монокоридоре из тополя бальзамического (Т), клена остролистного (К<sub>о</sub>) и липы мелколистной (Лп) по принципу коридорного способа выращивания дуба – уплотненный коридор, со схемой смешения пород: Т–Д–Д–К<sub>о</sub>+Лп, где быстрорастущая порода (Т) высажена в крайний теневой ряд, главная порода (Д) – в средних рядах, а сопутствующие породы (К<sub>о</sub>, Лп) – в крайний световой ряд; 2) прерывистая рядовая посадка дуба и тополя бальзамического макробиогруппами в чистом виде (при их чередовании блоками протяженностью 10 м), со схемой смешения пород: Д–Д–Д–Д × Т–Т–Т–Т; 3) прерывистая рядовая посадка дуба и березы повислой (Б) макробиогруппами в чистом виде (при их чередовании блоками протяженностью 10 м), со схемой смешения пород: Д–Д–Д–Д × Б–Б–Б–Б; 4) прерывистая рядовая посадка дуба и лиственницы сибирской (Лс) макробиогруппами в чистом виде (при их чередовании блоками по 10 м), со схемой смешения пород: Д–Д–Д–Д × Лс–Лс–Лс–Лс. Длина каждого из вариантов – 250 м.

Изучение роста древесных пород и оценку их лесопатологического состояния выполняли на постоянных пробных площадях согласно методикам и инструктивным указаниям [1, 2, 4, 7]. Проводили сплошной пересчет деревьев

с замером их высоты, диаметра ствола на высоте 1,3 м от шейки корня, определяли общее лесопатологическое состояние каждого дерева с отнесением к категории: жизнеспособные (условно здоровые и ослабленные листогрызущими вредителями), ограниченно жизнеспособные (пораженные стволовыми вредителями и гнилями, поперечным раком, с существенными травмами ствола и суховершинные), нежизнеспособные (с явными признаками отмирания в кроне и по стволу), лесной отпад (отмершие в различные сроки). Вегетативная масса дуба определялась по модельному дереву.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Исходя из данных наблюдений за развитием насаждений по вариантам опыта, можно отметить, что в первые 4–5 лет подбор пород не оказывал существенного влияния на дуб. Роль сопутствующих и быстрорастущих древесных пород начала проявляться после общего смыкания крон деревьев в 5-летнем возрасте насаждений. В 9-летнем насаждении сплошной рядовой посадки наблюдалась угнетенность дубков в результате их верхушечного затенения разросшимися кронами превосходящего в 3 раза по высоте тополя. Дубы имели более тонкие стволы с плохо развитыми кронами и уступали по росту и вегетативной массе дубам в вариантах прерывистой посадки. Биометрические показатели дуба в насаждении сплошной рядовой посадки были меньше, чем в прерывистых лесных полосах, по высоте – на 5,9...20,6 % и диаметру – на 12,5...28,1 % (табл. 1).

Таблица 1

**Биометрические показатели и вегетативная масса дуба черешчатого на опытных участках (возраст – 9 лет)**  
**Biometric indicators and vegetative mass of the English oak in the experimental plots (age – 9 years old)**

Вариант опыта	Высота, м	Диаметр ствола, см	Вегетативная масса, г		
			ствол	ветви	листья
1	3,4±0,12	3,2±0,16	2113	488	396
2	3,3±0,06	3,6±0,12	3047	1221	543
3	3,6±0,08	3,9±0,18	4090	1930	645
4	4,1±0,08	4,1±0,16	5417	1952	737

Модельные дубы, взятые в прерывистых лесных полосах, имеют большую в 1,6–2,7 раза общую вегетативную массу в сыром состоянии, чем в насаждении сплошной рядовой посадки. Характерным для всех вариантов опыта является преобладание массы стволов над остальными фракциями надземной части дуба – 61,4...70,5 % от общей вегетативной массы, но в прерывистых лесных полосах эта фракция больше в 1,4–2,6 раза, чем в сплошных. Масса кроны дуба в прерывистых лесных полосах варьирует в пределах 33,2...38,6 % от общей вегетативной массы и превышает массу кроны в насаждении сплошной рядовой посадки в 2–3 раза.

Прерывистые лесные полосы блочной посадки (варианты 2–4) с лесоводственно-биологических позиций в лучшей степени обеспечивают возможность проводить смешение главной, сопутствующей и быстрорастущей древесных пород и в большей мере исключают их угнетающее влияние в узких лесных

полосах. При этом в варианте, где блоки дуба чередовались с блоками лиственницы, дуб имеет лучшие показатели роста и развития, чем при чередовании блоков этого вида с блоками тополя. Превышение по высоте составляет 0,8 м (24,2 %), диаметру – 0,5 см (13,9 %) и вегетативной массе – 1,7 раза. При чередовании березы и дуба высота и диаметр последнего выше, чем эти показатели при его чередовании с тополем, соответственно на 0,3 м (9,1 %) и 0,4 см (11,1 %), а вегетативная масса – в 1,4 раза. Это, вероятно, связано с большей конкуренцией за влагу и питание со стороны тополя по сравнению с березой и лиственницей.

Анализ роста и развития деревьев в блоках (макробиогруппах) прерывистых лесных полос позволяет выделить четкие закономерности в размерах этих деревьев (табл. 2).

Таблица 2

**Показатели роста деревьев быстрорастущих и долговечных пород в зависимости от размещения в блоке на опытных участках (возраст – 9 лет)**  
**Growth indicators of the trees of fast-growing and durable species depending on their placement in a block in the experimental plots (age – 9 years old)**

Породы	Средние показатели по рядам насаждения (блоков)							
	1-й (заветренный)		2-й		3-й		4-й (наветренный)	
	<i>H</i> , м	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	<i>D</i> , см
Тополь/ дуб	10,9±	17,4±	11,1±	12,6±	10,8±	12,0±	10,6±	13,3±
	±0,13/ 2,9±	±0,64/ 3,2±	±0,15/ 3,1±	±0,49/ 2,8±	±0,06/ 3,1±	±0,37/ 2,6±	0,09/ 2,8±	±0,42/ 3,0±
	±0,09	±0,21	±0,11	±0,23	±0,10	±0,17	±0,07	±0,21
Береза/ дуб	9,7±	12,1±	10,0±	9,9±	9,6±	10,2±	9,2±	11,1±
	±0,09/ 3,8±	±0,24/ 4,8±	±0,16/ 3,9±	±0,46/ 4,1±	±0,11/ 3,6±	±0,27/ 3,6±	±0,09/ 3,3±	±0,27/ 3,8±
	±0,13	±0,11	±0,09	±0,17	±0,12	±0,19	±0,14	±0,25
Листвен- ница/дуб	7,5±	9,4±	7,7±	8,8±	7,1±	8,4±	6,8±	9,2±
	±0,09/ 3,8±	±0,27/ 4,7±	±0,11/ 4,6±	±0,14/ 4,0±	±0,17/ 4,2±	±0,26/ 3,9±	±0,08/ 3,7±	±0,19/ 4,1±
	±0,11	±0,26	±0,13	±0,13	±0,19	±0,17	±0,12	±0,11

Примечание: *H* – высота; *D* – диаметр ствола.

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что показатели роста у деревьев заветренного ряда насаждений больше, чем у деревьев наветренного ряда. Для тополя превышение по высоте составляет 0,3 м (2,8 %), по диаметру – 4,1 см (30,8 %), для березы – соответственно 0,5 м (5,4 %) и 1,0 см (9,0 %), для лиственницы – соответственно 0,7 м (10,3 %) и 0,2 см (2,2 %). У дуба при чередовании с блоками быстрорастущих пород такое превосходство по высоте равняется 0,1...0,5 м (3,6...15,2 %), по диаметру – 0,2...1,0 см (6,7...26,3 %). Эти различия объясняются неодинаковыми обеспеченностью деревьев почвенной влагой и микроклиматическими условиями в наветренных и заветренных рядах насаждений.

Высота деревьев в средних рядах блоков выше, чем в крайних: у дуба – на 10,6 %, у тополя – на 1,9 %, у березы – на 3,7 %, у лиственницы – на 3,5 %. Диаметр стволов деревьев в крайних рядах больше, чем во внутренних: у дуба – на 12,6 %, у тополя – на 24,8 %, у березы – на 15,4 %, у лиственницы – на 8,1 %. Различия в росте деревьев центральных и крайних рядов связаны с условиями освещения кроны и физиологическими процессами.

Сравнительный анализ материалов лесоучетных работ 2021 г. показал заметное влияние сочетаний древесных пород в лесных полосах на рост главной породы в 32-летнем возрасте. В результате конкуренции за ресурсы среды (свет, влагу, питательные вещества почвы) быстрорастущей и сопутствующих пород количество живых дубов в варианте лесной полосы сплошной рядовой посадки меньше на 35,6...52,1 %, чем в вариантах прерывистых лесных полос, от числа деревьев при посадке. Сохранившиеся резко угнетенные дубы в насаждении сплошной рядовой посадки сильно отстают по высоте и диаметру ствола (на 0,8...7,6 м и 4,1...12,7 см соответственно) от дубов в прерывистых лесных полосах блочной посадки (табл. 3).

Таблица 3

**Биометрические показатели и лесопатологическое состояние дуба черешчатого на опытных участках (2021 г.)**  
**Biometric indicators and forest pathology condition of the English oak in the experimental plots (2021)**

Вариант опыта	Высота, м	Диаметр ствола, см	Распределение деревьев по категориям состояния, шт./га (%)				
			Жизнеспособные	Ограниченно жизнеспособные	Нежизнеспособные	Отпад	Всего
1	8,8±1,40	8,3±1,81	51 (3,6)	149 (10,5)	348 (24,4)	877 (61,5)	1425
2	9,6±1,02	12,4±2,32	399 (21,3)	551 (29,4)	428 (22,8)	496 (26,5)	1874
3	14,7±0,86	18,6±2,98	623 (29,1)	547 (25,6)	594 (27,8)	375 (17,5)	2139
4	16,4±0,59	21,0±3,31	557 (30,9)	396 (22,0)	481 (26,7)	368 (20,4)	1802

В прерывистых лесных полосах более крупномерен дуб на участке его совместного произрастания с лиственницей, затем следуют участки с березой и тополем. В пределах блоков дубы крайних рядов по сравнению с деревьями средних рядов имеют больший диаметр (на 30,6...45,6 %). Несколько меньшая разница по высоте (6,9 %) между крайними и средними рядами наблюдается только для варианта 4 при ее значениях в средних рядах 15,8 м и крайних – 16,9 м. В вариантах 2 и 3 высоты дуба в средних и крайних рядах одинаковы и составляют соответственно 9,6 и 14,7 м. Во всех вариантах опыта деревья крайних рядов имеют однобоко развитые в сторону поля кроны, касающиеся нижними ветвями поверхности земли. Стволы деревьев внутренних рядов более прямые и с приподнятой кроной.

Отсутствие рубок ухода в древостоях опытных вариантов во время роста и формирования насаждения (осветления – до 10-летнего возраста, прочистки – в 11–20 лет, прореживания – в 21–32 года) привело к наличию значительного количества дубов категорий «лесной отпад» и «нежизнеспособные». При этом в варианте лесной полосы сплошной рядовой посадки доля лесного отпада и нежизнеспособных деревьев превышает показатель в вариантах прерывистых лесных полос на 36,6...40,6 %. Количество жизнеспособных дубов в вариантах прерывистых лесных полос больше на 17,7...27,3 %, чем в варианте лесной полосы сплошной рядовой посадки, а ограниченно жизнеспособных – на 11,5...18,9 %.

## Заключение

Таким образом, способы посадки лесных полос и подбор древесных пород в схемах смешения являются значимыми факторами при создании дубовых насаждений, но не меньшее значение имеет своевременность проведения лесоводственного ухода за посадками. Несоблюдение режимов рубок ухода в лесных полосах приводит к ухудшению роста и жизнеспособности главной породы – дуба черешчатого и древостоя в целом.

Для поддержания хорошего санитарного состояния, устойчивости и мелиоративной эффективности защитных лесонасаждений необходим своевременный лесоводственный уход, обеспечивающий формирование здоровых деревьев главной породы в сочетании с лучшими деревьями сопутствующих и быстрорастущих пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с. Anuchin N.P. *Forest Inventory*. 5th ed., enlarged. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1982. 552 p. (In Russ.).
2. Артюховский А.К., Харченко Н.А., Быков Н.А., Арефьев Ю.Ф. Экологические основы лесозащиты в насаждениях зеленых зон. Воронеж: ВГУ, 1994. 128 с. Artyukhovskiy A.K., Kharchenko N.A., Bykov N.A., Aref'ev Yu.F. *Ecological Basics of Forest Protection in Green Areas*. Voronezh, VSU Publ., 1994. 128 p. (In Russ.).
3. Векшегонов В.Я. Шахматный способ создания полезащитных лесных полос (Из опыта лесоразведения в Целинном крае). М.: Лесн. пром-сть, 1965. 84 с. Vekshegonov V.Ya. *The Chessboard Method of Creating Forest Shelterbelts (From the Experience of Afforestation in the Tselinnyi Territory)*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 84 p. (In Russ.).
4. Дударев А.Д., Гладышева Н.В., Лозовой А.Д. Методика и техника работ на пробных площадях. Воронеж, 1978. 80 с. Dudarev A.D., Gladysheva N.V., Lozovoy A.D. *Methods and Techniques of Work on the Test Areas*. Voronezh, 1978. 80 p. (In Russ.).
5. Ключников Ю.В. Коридорный способ посадки и посева дуба с быстрорастущими породами в лесных полосах // Совет. агрономия. 1948. № 8. С. 52–57. Klyuchnikov Yu.V. Corridor Method of Planting and Sowing Oak with Fast-Growing Species in Forest Belts. *Sovetskaya agronomiya*, 1948, no. 8, pp. 52–57. (In Russ.).
6. Коротун А.М. Из опыта посадки крупномерного посадочного материала на целинных землях Голодной степи // Лесн. хоз-во. 1962. № 2. С. 32–36. Korotun A.M. From the Experience of Planting Large-Sized Material on the Virgin Lands of the Mirzacho'l Steppe. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 2, pp. 32–36.
7. Наставление по организации и ведению лесопатологического мониторинга в лесах России / М-во природ. ресурсов Рос. Федерации, Всерос. науч.-исслед. ин-т лесоводства и механизации лесн. хоз-ва. М.: ВНИИЛМ, 2001. 86 с. *Manual on Organization and Management of Forest Pathology Monitoring in the Forests of Russia*. Comp. By the Ministry of Natural Resources of the RF and the All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization. Moscow, All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization Publ., 2001. 86 p. (In Russ.).
8. Павловский Е.С. Диагонально-групповой способ размещения биогрупп при посадке полезащитных лесных полос // Вестн. с.-х. науки. 1960. № 5. С. 120–123. Pavlovskiy E.S. Diagonal-Group Method of Placing Biogroups When Planting Shelterbelts. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 1960, no. 5, pp. 120–123. (In Russ.).
9. Петров Н.Г. О сезонах и сроках посадки древесных пород крупномерными саженцами // Сб. науч. работ Науч.-исслед. ин-та сельск. хоз-ва Центр.-Чернозем. полосы им. В.В. Докучаева. М.: Россельхозиздат, 1965. Т. 3. С. 277–284. Petrov N.G. On the Seasons and Timing of Planting Large-Sized Tree Species. *The Collection of Scientific Papers of the Scientific Research Institute of Agriculture of the*

*Central Black Earth Zone Named after V.V. Dokuchaev*. Moscow, Rossel'khozizdat Publ., 1965, vol. 3, pp. 277–284. (In Russ.).

10. Скачков Б.И., Чеканышкин А.С. Новое направление в выращивании защитных и стокорегулирующих полос // Вестн. Рос. акад. с.-х. наук. 1992. № 3. С. 35–36. Skachkov B.I., Chekanyshkin A.S. A New Direction in the Cultivation of Field Protection and Runoff Control Strips. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 1992, no. 3, pp. 35–36. (In Russ.).

11. Чеканышкин А.С. Основы устойчивости и долговечности защитных лесных насаждений в условиях ЦЧЗ // Лесн. хоз-во. 2010. № 3. С. 29–30.

Chekanyshkin A.S. The Fundamentals of Sustainability and Durability of Protective Forest Plantations in the Conditions of the Central Black Earth Zone. *Lesnoye khozyaystvo*, 2010, no. 3, pp. 29–30. (In Russ.).

12. Bock M.D., Van Rees K.C.J. Mechanical Site Preparation Impacts on Soil Properties and Vegetation Communities in the Northwest Territories. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 32, no. 8, pp. 1381–1392. <https://doi.org/10.1139/x02-067>

13. Chantal de M., Leinonen K., Ilvesniemi H., Westman C.J. Effects of Site Preparation on Soil Properties and on Morphology of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* Seedlings Sown at Different Dates. *New Forests*, 2004, vol. 27, pp. 159–173. <https://doi.org/10.1023/A:1025042632491>

14. Coates K.D. Tree Recruitment in Gaps of Various Size, Clearcuts and Undisturbed Mixed Forest of Interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 155, iss. 1–3, pp. 387–398. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00574-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00574-6)

15. Concha J.Y., Alegre J.C., Pocomucha V. Determinación de las Reservas de Carbono en la Biomasa Aérea de Sistemas Agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el Departamento de San Martín, Peru. *Ecología Aplicada*, 2007, vol. 6, no. 1–2, pp. 75–82. (In Span.). <https://doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.343>

16. Jonard M., Misson L., Ponette Q. Long-Term Thinning Effects on the Forest Floor and the Foliar Nutrient Status of Norway Spruce Stands in the Belgian Ardennes. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, vol. 36, no. 10, pp. 2684–2695. <https://doi.org/10.1139/x06-153>

17. Jose S. Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview. *Agroforestry Systems*, 2009, vol. 76, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>

18. Korb J.E., Fulé P.Z., Gideon B. Different Restoration Thinning Treatments Affect Level of Soil Disturbance in Ponderosa Pine Forests of Northern Arizona, USA. *Ecological Restoration*, 2007, vol. 25, iss. 1, pp. 43–49. <https://doi.org/10.3368/er.25.1.43>

19. Lacombe S., Bradley R.L., Hamel C., Beaulieu C. Do Tree-Based Intercropping Systems Increase the Diversity and Stability of Soil Microbial Communities? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, vol. 131, iss. 1–2, pp. 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.010>

20. Löf M., Dey D.C., Navarro R.M., Jacobs D.F. Mechanical Site Preparation for Forest Restoration. *New Forests*, 2012, vol. 43, pp. 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>

21. Peltola H., Kilpeläinen A., Sauvala K., Räisänen T., Ikonen V.-P. Effects of Early Thinning Regime and Tree Status on the Radial Growth and Wood Density of Scots Pine. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41, no. 3, art. no. 285. <https://doi.org/10.14214/sf.285>

22. Reynolds P.E., Simpson J.A., Thevathasan N.V., Gordon A.M. Effects of Tree Competition on Corn and Soybean Photosynthesis, Growth, and Yield in a Temperate Tree-Based Agroforestry Intercropping System in Southern Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 2007, vol. 29, iss. 4, pp. 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.024>

23. Weiskittel A.R., Kenefic L.S., Seymour R.S., Phillips L.M. Long-Term Effects of Precommercial Thinning on the Stem Dimensions, Form and Branch Characteristics of Red Spruce and Balsam Fir Crop Trees in Maine, USA. *Silva Fennica*, 2009, vol. 43, no. 3, art. no. 196. <https://doi.org/10.14214/sf.196>

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 582.475:581.45:57.087(470.13)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-73-91

## Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть I. Моделирование периметра поперечного сечения иглы

С.И. Тарасов, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [A-7112-2016](https://orcid.org/0000-0003-2081-5090),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2081-5090>

Н.В. Герлинг<sup>✉</sup>, канд. биол. наук; *ResearcherID*: [Q-2273-2015](https://orcid.org/0000-0001-5224-8452),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8452>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28,  
г. Сыктывкар, Россия, 167982; tarasov@ib.komisc.ru, gerling@ib.komisc.ru<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 14.07.22 / Одобрена после рецензирования 10.10.22 / Принята к печати 12.10.22

**Аннотация.** Несмотря на наличие измерительных систем, позволяющих оценивать площадь поверхности листовых органов высших растений, потребность в простых стандартных методах определения этого показателя остается для физиологов растений актуальной. В основе построенных на геометрии отдельной хвоинки методов оценки площади поверхности иглоподобных листовых органов хвойных лежит общий принцип – вычисление площади поверхности хвоинки как произведения ее длины на периметр ее поперечного сечения. Это делает периметр поперечного сечения одним из наиболее важных параметров, необходимых для характеристики площади поверхности хвоинки. Сильная изменчивость данного параметра от вида обуславливает необходимость разработки индивидуальных моделей поперечного сечения отдельных хвоинок. Цель исследования – создать универсальную модель оценки периметра поперечного сечения иглы, не зависящую от видовой принадлежности дерева. Для практической реализации поставленной цели был предложен метод оценки периметра поперечного сечения иглы, основанный на известном факте, что любая замкнутая линия трансформируема в эквивалентную окружность, при этом длина замкнутой линии не изменяется. Периметр эквивалентной окружности может быть связан с параметрами геометрической фигуры до трансформации. Такой подход позволяет связать ширину и толщину поперечного сечения иглы с его периметром. Разработанная универсальная модель поперечного сечения иглы была верифицирована на поперечных срезах хвои пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) и можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.). Образцы хвои указанных древесных растений отобраны в чернично-сфагновом ельнике в бореальной зоне северо-востока европейской части России (Княжпогостский район, Республика Коми). Статистический анализ показал значимость и адекватность модели. Она может применяться для оценки периметра игл хвойных независимо от их видовой принадлежности. При этом точность оценки сравнима с точностью непосредственного измерения периметра методом кусочно-линейной аппроксимации.

**Ключевые слова:** хвойные, площадь поверхности иглы, периметр поперечного сечения иглы, эквивалентный радиус, моделирование

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках темы НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России» (№ госрегистрации – 122040100031-8).

*Для цитирования:* Тарасов С.И., Герлинг Н.В. Иглоподобные листовые органы хвойных. Часть I. Моделирование периметра поперечного сечения иглы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 73–91. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-73-91>

Original article

## Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part I. Modeling the Needle Cross-Section Perimeter

*Sergey I. Tarasov*, Candidate of Biology; ResearcherID: [A-7112-2016](https://orcid.org/0000-0003-2081-5090).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2081-5090>

*Natal'ya V. Gerling*<sup>✉</sup>, Candidate of Biology; ResearcherID: [Q-2273-2015](https://orcid.org/0000-0001-5224-8452).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5224-8452>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; tarasov@ib.komisc.ru, gerling@ib.komisc.ru<sup>✉</sup>

Received on July 14, 2022 / Approved after reviewing on October 10, 2022 / Accepted on October 12, 2022

**Abstract.** Despite the availability of measuring systems for estimating the surface area of leaf organs of higher plants, the need for simple standard methods for determining this indicator area remains relevant for plant physiologists. The methods for estimating the surface area of needle-like leaf organs of conifers, based on the geometry of an individual needle rest on the general principle of calculating the needle surface area as the product of its length by the perimeter of its cross-section. This makes the cross-section perimeter one of the most important parameters needed to characterize the needle surface area. The strong variability of this parameter depending on the species necessitates the development of individual models of the cross-section of individual needles. The aim of this study has been to create a universal model for estimating the needle cross-section perimeter, irrespective of the tree species. For the practical implementation of the aim, a method was proposed for estimating the perimeter of the needle cross-section, based on the well-known fact that any closed line is transformable into an equivalent circle, while the length of the closed line does not change. The perimeter of the equivalent circle can be related to the parameters of the geometric figure before the transformation. This approach allows us to relate the width and thickness of the needle cross-section to its perimeter. The developed universal model of the needle cross-section has been verified on cross-sections of Siberian fir (*Abies sibirica* L.) and common juniper (*Juniperus communis* L.) needles. The samples of needles of these woody plants have been collected from a bilberry-sphagnum spruce forest in the boreal zone of the north-east of the European part of Russia (Knyazhpogostkiy district, the Komi Republic). Statistical analysis has shown the significance and adequacy of the model. It can be used to assess the perimeter of coniferous needles, irrespective of their species. In this case, the accuracy of perimeter estimation is comparable to the accuracy of direct perimeter measurement by the piecewise linear approximation method.

**Keywords:** conifers, needle surface area, needle cross-section perimeter, equivalent radius, modelling

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the research topic “Zonal Patterns of the Dynamics of the Structure and Productivity of Primary and Anthropogenically Modified Phytocenoses of Forest and March Ecosystems of the European North-East of Russia” (state registration no. 122040100031-8).



**For citation:** Tarasov S.I., Gerling N.V. Needle-Like Leaf Organs of Conifers. Part I. Modeling the Needle Cross-Section Perimeter. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 3, pp. 73–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-73-91>

### Введение

Анализ поперечных срезов игл хвойных разных видов показывает, что форма плоских фигур, которые соответствуют поперечным сечениям игл, в большинстве случаев отличается от формы фигур, изучаемых в геометрии, т. е. соответствующие поперечным сечениям игл фигуры не могут быть описаны конечным числом прямых линий, как, например, ромб, или плавной кривой, как эллипс. Разнообразие форм игл хвои в зависимости от видовой принадлежности, морфологической структуры, экологических условий и возраста детерминирует существенную вариабельность формы их сечений [13, 14].

В основе методов оценки площади поверхности отдельной хвоинки, построенных на ее геометрии, лежит общий принцип – определение площади как произведения длины хвоинки на периметр ее поперечного сечения. В то же время поперечное сечение – наиболее изменчивая характеристика иглы по видам. Многообразие форм иглоподобных листовых органов голосеменных [4] обуславливает многообразие методик оценки поперечного сечения игл [1].

Например, для сосны (*Pinus sylvestris* L.) поперечное сечение отдельной иглы аппроксимируется полукругом [16]. Исходя из этого предположения, периметр поперечного сечения хвоинки оценивается как

$$P = 2r + \pi r,$$

где  $r$  – радиус иглы (половина ширины).

В [5] принимается, что поперечное сечение хвои черной ели (*Picea mariana* Mill.) представляет собой ромб с отношением диагоналей  $r = 1,5$ ; поперечное сечение хвои сосны обыкновенной (*Pinus banksiana* Lamb.) – гемизэллипс (эллипс, разделенный пополам вдоль длинной оси  $a$ ) с отношением осей  $r = 1,5$ . Соответственно, периметр ромба определяется как  $P = \sqrt{r^2 + 1}$ , гемизэллипса – как  $P = r + \frac{\pi}{2} \left( \frac{r^2 + 1}{2} \right)^{0,5}$ . Периметр поперечного сечения хвоинки сосны в [2] оценивается по формуле  $P = \frac{\pi}{2}(1,137b + a)$ , ели – по формуле  $P = 2\sqrt{a^2 + b^2}$ , где  $a, b$  – толщина и ширина хвои соответственно.

Если поперечное сечение хвоинки непостоянно по ее длине, то хвоинку разделяют на несколько частей, площади поверхностей которых затем суммируются [3, 12]. Например, для периметра сечения хвоинки лиственницы в [3] предлагается несколько вариантов расчета в зависимости от формы поперечного сечения хвоинки:

$$P = 2,1\sqrt{a^2 + b^2}; P = 2,06\sqrt{a^2 + b^2}.$$

Следует отметить, что для игл, форма поперечного сечения которых близка к геометрической фигуре, например *Cedrus libani* или *P. cembroides* var. *monophylla* [14], необходимости в разработке специальных методов оценки периметра нет. Периметр поперечного сечения таких игл вычисляется по известным формулам.

При значительном разнообразии форм игл хвойных разработка методов оценки периметров поперечного сечения игл, зависящих от вида, непродуктивна, что обуславливает актуальность разработки общего универсального метода. Цель данной работы – создать универсальную модель оценки периметра поперечного сечения иглы, не зависящую от видовой принадлежности дерева.

#### *Объекты и методы исследования*

Отбор образцов хвои пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) с целью оценки площади поверхности листовой пластинки проводили в чернично-сфагновом ельнике, расположенном в бореальной зоне северо-востока европейской части России (Княжпогостский район, Республика Коми; 62°16'03" с. ш. 50°41'07" в. д.). Из побегов 1–3-го годов развития из средней части кроны 10 деревьев пихты сибирской, входящих в 1-й ярус древостоя, было отобрано 30 экземпляров хвои.

Взятие образцов хвои можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) проводили в чернично-сфагновом ельнике, расположенном там же. 30 образцов хвои отбирали из побегов 1–3-го годов развития из средней части кроны 10 здоровых кустов можжевельника обыкновенного. Хвою 2-го года развития для препарирования выбирали случайным образом.

В рамках разработанной методики для оценки площади поверхности единичной хвоинки измеряли ширину в средней части  $W$ , толщину  $T$  и длину  $L$  хвоинок. Ширину – измерительной лупой ЛИ-3-10× (ГОСТ 25706–83), длину – измерительной линейкой (ГОСТ 427–75), погрешность в обоих случаях –  $\pm 0,5$  мм. Далее каждую хвоинку разрезали на сегменты, поперечные срезы хвои готовили на микротоме МЗП-01 («Техном», Россия). Длина сегмента равнялась толщине гистологического среза (50 мкм). Каждый 10-й сегмент отдельной хвоинки для можжевельника и 20-й сегмент для пихты использовали при дальнейших измерениях: всего было отобрано 457 гистологических срезов хвои можжевельника и 686 – пихты. Готовые препараты просматривали в световом микроскопе Axiovert 200 M (Karl Zeiss, Германия) и фотографировали. Фото съемку производили цифровой камерой AxioCam ERc 5s (Carl Zeiss, Германия). Измерение морфометрических параметров (ширины  $W_i$ , толщины  $T_i$  и периметра  $P_{ri}$  сегмента проводили на полученных фотоснимках с использованием программы Carl Zeiss Vision (Carl Zeiss, Германия), погрешность измерения длины –  $\pm 0,05$  мкм. Периметр поперечного сечения иглы аппроксимировался кусочно-линейной функцией.

*Теоретические предпосылки.* В биологии изменения формы, связанные с размерами изучаемого объекта (или зависимость формы от размера), рассматриваются в рамках общей теории переменных размера и формы. Изменения формы, сопровождающие изменение размеров, происходят у многих видов организмов и являются предметом аллометрии. Форма всегда связана с различными переменными размера [18]. Эта связь выражается зависимостью некоторой переменной формы от некоторой переменной размера. Любая форма сечения иглы может быть описана в терминах выбранных переменных формы и размера. Соответственно, выбор переменных размера и формы является важной частью аллометрического исследования.

*Переменная размера.* Будем называть формой поперечного сечения иглы (или просто формой сечения) геометрическую фигуру, описываемую замкну-

той кривой, являющейся границей (контуром) плоской фигуры, совпадающей с этим сечением. Фигура, имеющая замкнутый контур, однозначно определяется формой и длиной периметра либо формой и ее площадью [20]. Поскольку в контексте поставленной проблемы интерес представляет длина периметра поперечного сечения иглы, то в качестве переменной размера естественно выбрать периметр.

Плоская кривая, описывающая периметр поперечного сечения иглы произвольной формы, путем жесткой трансформации (т. е. при неизменном периметре (длине) контура) может быть преобразована в окружность с эквивалентным радиусом (рис. 1) [20].

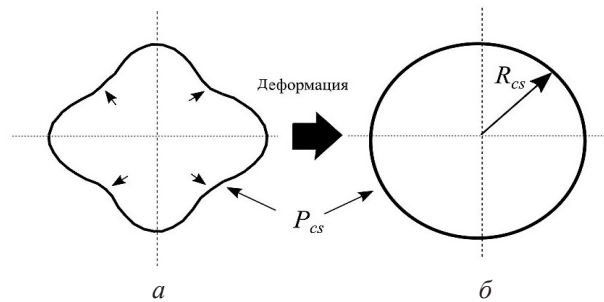


Рис. 1. Модель поперечного сечения иглы до и после трансформации: *a* – условное поперечное сечение хвоинки до трансформации, короткими стрелками внутри поперечного сечения обозначено направление деформации; *б* – круг, полученный в результате трансформации, с длиной окружности, равной периметру поперечного сечения иглы ( $P_{cs}$  – периметр поперечного сечения иглы;  $R_{cs}$  – эквивалентный радиус поперечного сечения)

Fig. 1. The model of the needle cross-section before and after transformation: *a* – conventional cross-section of the needle before transformation, short arrows inside the cross-section indicate the direction of deformation; *б* – circle obtained as a result of transformation, with the circumference equal to the needle cross-section perimeter ( $P_{cs}$  – needle cross-section perimeter;  $R_{cs}$  – cross-section equivalent radius)

Если периметр равен  $P_{cs}$ , то эквивалентный радиус поперечного сечения

$$R_{cs} = \frac{P_{cs}}{2\pi}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что эквивалентный радиус, так же как и периметр, является однозначной характеристикой любой кривой – границы сечения иглы – и может быть выбран в качестве переменной размера сечения иглы.

*Переменная формы.* Наиболее эффективным способом количественного описания форм биологических объектов считается метод опорных точек, которые располагают на изучаемом объекте в соответствии с каким-либо его свойством [7, 18]. Для сечений игл опорными точками удобнее выбрать точки, наиболее удаленные от других [7], или экстремальные, поскольку наличие экстремальных точек прослеживается для любой формы сечения. Однако выбор таких точек для сечений игл хвойных неоднозначен.

Наиболее просто определяются опорные точки для симметричных форм сечения (рис. 2, *a, б*).

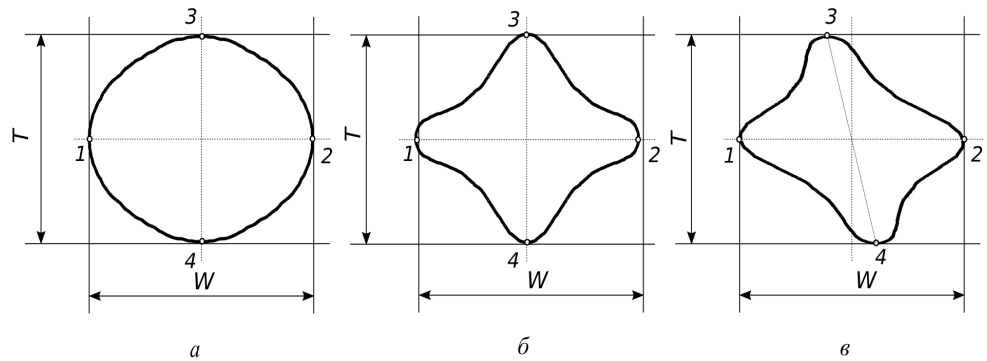


Рис. 2. Выбор опорных точек поперечного сечения иглы в зависимости от формы сечения: а, б – соответственно выпуклая и невыпуклая, симметричные относительно большой оси; в – невыпуклая, симметричная относительно центра тяжести

Fig. 2. The selection of reference points of the needle cross-section depending on its shape: а, б – convex and non-convex, respectively, symmetric with respect to the major axis; в – non-convex, symmetric with respect to the centre of gravity

Как правило, у сечения иглы симметричной формы можно выделить 4 экстремальных точки (рис. 2). Расстояние между наиболее удаленными точками 1 и 2 будем называть шириной иглы. Прямую, соединяющую данные точки, рассмотрим как большую ось. Параллельно большой оси можно провести 2 касательные прямые так, что весь контур сечения иглы будет располагаться между этими прямыми и иметь с ними, по крайней мере, по 1 общей точке. Общие точки пересечения контура сечения иглы с касательными прямыми выберем в качестве 2-й пары опорных точек (точки 3, 4 на рис. 2). Прямую, перпендикулярную большой оси и соединяющую данные точки, будем рассматривать как малую ось, расстояние между этими точками – толщина иглы.

На практике возможна ситуация, когда прямая, соединяющая 2-ю пару опорных точек, неперпендикулярна большой оси [14]. В таких случаях за толщину будем принимать расстояние между касательными (рис. 2, в).

Специальный случай представляют ладьеобразные сечения, характерные для игл с рельефной центральной жилкой внизу, вверху или по обе стороны, например у *Abies nordmaniana*, *A. arizonica*, *A. amabilis*, *Sciadopitys verticillata*, *Sequoiadendron giganteum* [14]. У сечений игл этих видов хвойных касательная, параллельная большой оси, имеет 2 общие точки с контуром и, соответственно, 2 опорные точки, т. е. вогнутость контура делает неопределенным понятие толщины сечения (рис. 3, б). В таких случаях трансформируем вогнутую часть контура сечения путем ее зеркального отражения относительно касательной, проведенной к опорным точкам исходной фигуры (рис. 3, в). Расстояние между крайними точками (точки 5, 6 на рис. 3, в) получившейся в результате трансформации фигуры будем считать толщиной.

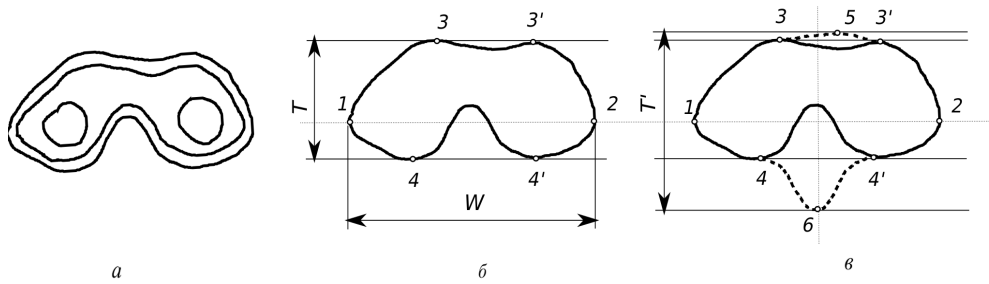


Рис. 3. Выбор опорных точек у видов хвойных, имеющих ладьеобразную форму поперечного сечения иглы: а – схематичное изображение сечения иглы *Sciadopitys verticillata* [14]; б, в – расположение опорных точек до и после трансформации соответственно  
 Fig. 3. The selection of reference points for conifer species having a boat-shaped needle cross-section: а – schematic representation of a *Sciadopitys verticillata* needle cross-section [14]; б, в – location of reference points before and after transformation, respectively

Еще один специальный случай представляют формы сечений игл, симметричные относительно малой оси (рис. 4): у сечений такой формы опорные точки располагаются на одной прямой, которая совпадает с большой осью. Подобную форму сечения игл можно наблюдать у хвои некоторых видов сосны [15]. Наиболее удаленными в этом случае будут экстремальные точки 1 и 2, расстояние между ними соответствует ширине иглы, а также точки 3 и 4, расстояние между которыми – это толщина (рис. 4, б).

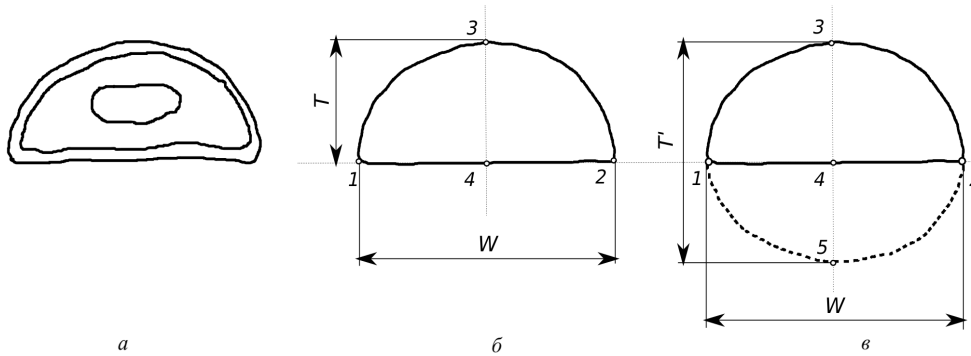


Рис. 4. Выбор опорных точек сечения игл у хвои некоторых видов сосны: а – схематичное изображение сечения иглы *Pinus sylvestris* [14]; б, в – расположение опорных точек до и после трансформации соответственно

Fig. 4. The selection of reference points for the cross-section of needles in the needles of some pine species: а – schematic representation of a *Pinus sylvestris* needle cross-section [14]; б, в – location of reference points before and after transformation, respectively

Для того, чтобы оценка периметров таких сечений проводилась на основании общей модели, необходима следующая трансформация: кривая 1–3–2 зеркально отражается относительно большой оси, полученная фигура рассматривается как сечение иглы (рис. 4, в). Прямую, перпендикулярную большой оси и соединяющую опорные точки 3, 5, будем рассматривать как малую ось, расстояние между этими точками – толщина иглы  $T'$ . Из построения следует, что  $T' = 2T$ . Если толщина трансформированной формы сечения меньше

ширины ( $T' < W$ ), то переменная формы определяется по общей методике ( $T'/W = 2T/W$ ), если больше, то как  $W/T' = W/2T$ . Эквивалентный радиус в этом случае находится по формуле

$$R_{cs} = \frac{P_{cs} - W}{\pi},$$

где  $P_{cs}$  – периметр фигуры 1–3–2–5.

Определив в соответствии с вышеизложенным опорные точки сечения иглы, можно для каждой формы сечения сопоставить толщину и ширину. Отношение толщины к ширине выберем в качестве безразмерной переменной формы [18].

*Пределы изменчивости формы поперечного сечения иглы.* Большинство форм сечения игл имеет 2 перпендикулярные оси симметрии. Частота встречаемости таких форм выше, чем асимметричных. В каждую симметричную форму сечения может быть вписан 4-угольник (ромб), в свою очередь, каждая симметричная форма сечения может быть вписана в эллипс (рис. 5).

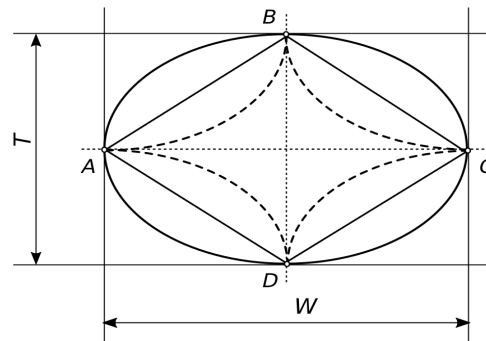


Рис. 5. Границы variability размеров периметра симметричных форм поперечного сечения игл хвойных

Fig. 5. The limits of variability of the perimeter dimensions of symmetric cross-sectional shapes of coniferous needles

Очевидно, что периметр ромба  $ABCD$  является минимальным из периметров 4-угольников, которые можно вписать в эллипс так, чтобы их вершины совпадали с его опорными точками. С другой стороны, периметр эллипса является верхним пределом для периметров фигур, которые можно в него вписать. Если периметр вписанной фигуры превысит периметр эллипса, то это приведет к изменению положения экстремальных точек, размеров соответствующих им осей и, следовательно, периметра описанного эллипса. Почти все возможные контуры сечений игл будут ограничены периметром эллипса и фигуры, образованной симметричным отражением его дуг  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  и  $DA$  относительно соответствующих ребер ромба (на рис. 5 данная фигура обозначена пунктирной линией). Пусть периметр эллипса равен  $P_e$ , а периметр ромба –  $P_r$ , тогда для периметра  $P_s$  симметричной формы сечения иглы справедливо:

$$P_r < P_s < P_e. \quad (2)$$

Так как длина полуосей выбрана произвольно, данное неравенство справедливо при любом отношении полуосей (при любом значении переменной формы).

Для форм поперечного сечения игл, не обладающих осевой симметрией, возможны 2 случая. Первый, когда оси сечения смещены относительно друг друга и симметрия формы сечения наблюдается относительно одной из них (рис. 6, а). В результате этого 4-угольник  $ABCD$ , вершины которого совпадают с



опорными точками, не является ромбом. Второй, когда одна из осей «разорвана» (рис. 6, в). Это также приводит к тому, что 4-угольник  $ABCD$ , вершины которого совпадают с опорными точками, не является ромбом. Нас интересует, как соотносятся периметры данных 4-угольников с периметрами ромба и эллипса.

Из построения очевидно, что оба случая тождественны, и достаточно рассмотреть периметры треугольников  $ABD$  и  $A'BD$  – рис. 6, б (или  $ABC$  и  $AB'C$  – рис. 6, з).

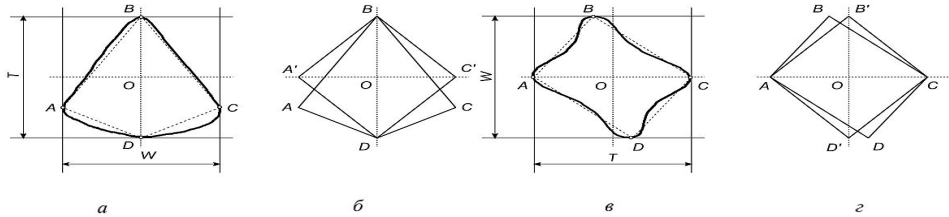


Рис. 6. Границы variability периметра асимметричных форм поперечного сечения хвои

Fig. 6. The limits of variability of the perimeters of asymmetric cross-sectional shapes of coniferous needles

Все треугольники, построенные на одном основании (в нашем случае –  $BD$  ( $AC$ )) и имеющие одну высоту –  $A'O$  ( $B'O$ ), будут равновеликими (характеризоваться одной и той же площадью) (рис. 6, б, з). Равносторонний треугольник характеризуется наименьшим периметром по сравнению со всеми другими равновеликими треугольниками [8]. Следовательно, периметр треугольника  $ABD$  будет больше периметра треугольника  $A'BD$  (рис. 6, б), так же соотносятся периметры треугольников  $ABC$  и  $AB'C$  (рис. 6, з). Получается, что периметр 4-угольника  $ABCD$  превышает периметр ромба  $A'BC'D$  ( $AB'CD'$ ). Таким образом, неравенство (2) выполняется для вариантов форм сечения игл с различным типом симметрии.

Используя полученные универсальные переменные  $P$  (или  $R$ ) и  $T/W$ , однозначно описывающие любую форму сечения иглы, можно построить модель, отражающую зависимость переменной размера от переменной формы, т. е. зависимость периметра (или эквивалентного радиуса) сечения от отношения малой и большой осей. Соответственно, зная толщину и ширину хвоинки, можно оценить периметр сечения иглы.

*Выбор модели.* Из неравенства (2) следует, что значение переменной размера для заданной переменной формы не превышает значений этой переменной для эллипса и ромба. Можно предположить, что функция, описывающая зависимость размера от формы для поперечного сечения иглы, будет подобна в некотором смысле таким же функциям для эллипса и ромба. Действительно, эллипс и ромб могут быть описаны теми же переменными размера и формы, которые мы определили для формы сечений игл, и, кроме того, периметры данных фигур просто рассчитываются по известным формулам.

Для ромба периметр связан с длиной большой полуоси  $a$  и малой полуоси  $b$  формулой [21]

$$P_{rh} = 4\sqrt{a^2 + b^2} = 4(a^2 + b^2)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $a = W/2$ ;  $b = T/2$ .

Для эллипса периметр может быть связан с величиной большой и малой полуосей следующей приближенной формулой [17]:

$$P_e \approx 4(a^x + b^x)^{\frac{1}{x}}, \quad (4)$$

$$x = \ln 2 / \ln \frac{\pi}{2} = 1,5349.$$

Следовательно, используя выражения (3), (4), для данных фигур можно построить графики зависимости переменной размера от переменной формы. Изменение переменной формы ограничено пределами от 0 до 1 ( $0 \leq T/W \leq 1$ ), поскольку при  $T > W$  ширина переходит в толщину и наоборот. Зададим максимальную длину большой оси равной 2 и будем изменять длину малой оси от 0 до 2. Зависимость переменной размера (эквивалентного радиуса)  $R_{cs}$  от формы (переменной формы  $T/W$ ) для эллипса и ромба показана на рис. 7.

Для ромба в качестве модели зависимости переменной размера от переменной формы использовали формулу

$$R_{cs} = \frac{4(a^2 + b^2)^{1/2}}{2\pi},$$

для эллипса –

$$R_{cs} = \frac{4(a^{1,53} + b^{1,53})^{1/1,53}}{2\pi}.$$

Из рис. 7 видно, что при одном и том же отношении большой и малой осей эквивалентный радиус эллипса всегда больше, чем радиус ромба.



Рис. 7. Зависимость переменной размера от переменной формы для ромба (1) и эллипса (2)

Fig. 7. The dependence of the size variable on the shape variable for a rhombus (1) and an ellipse (2)

Анализируя полученные зависимости и учитывая, что размеры эквивалентных радиусов сечений игл хвойных занимают промежуточное положение между размерами эквивалентных радиусов ромба и эллипса (см. рис. 5), можно выдвинуть следующие априорные предположения:

1) зависимость переменной размера от переменной формы для поперечного сечения иглы является нелинейной;

2) кривые, описывающие зависимость эквивалентного радиуса от переменной формы сечения иглы, будут располагаться между кривыми для ромба и эллипса;

3) так как абсолютно плоских игл не существует, что связано с наличием у них внутренних структур, в частности проводящего цилиндра, отношение толщины иглы к ее ширине не может быть меньше некоторого значения, определяемого поперечными размерами проводящего цилиндра;

4) так как в области малых значений переменной формы эквивалентный радиус эллипса близок к эквивалентному радиусу ромба, эквивалентный радиус иглы в среднем будет превышать эквивалентный радиус ромба и эллипса, что, в свою очередь, обусловит сдвиг кривой по оси переменной размера, т. е. в области малых значений кривая, описывающая зависимость эквивалентного радиуса контура сечения иглы, будет иметь по крайней мере одну общую точку с кривой эллипса.

Формирование модельной выборки переменных размера и формы, наиболее полно характеризующей генеральную совокупность возможных поперечных сечений игл, производилось на основании литературных источников. Различные варианты сечений игл голосеменных видов растений представлены в книге G. Krüssmann [14]. Данные о параметрах поперечных сечений игл ели были взяты из работы [13]. Всего рассмотрено 117 поперечных сечений игл голосеменных видов растений и получено столько же пар параметров «ширина–толщина».

Для приведения всех данных к одному масштабу вместо переменной размера  $R_{cs}$  на практике использовали переменную размера  $R_{cs}/W$ . Диаграмма рассеяния полученных значений переменных и аппроксимирующие модели совместно с моделями для эллипса и ромба показаны на рис. 8.

Традиционная для аллометрии аппроксимация, полученная через степенную функцию, не дает хорошего результата. Однако степенная функция не является единственным средством описания аллометрических тенденций [11], более точные аппроксимации могут дать полиномы некоторой степени [6]. Аллометрическая зависимость формы и размера для эллипса и ромба хорошо описывается полиномами 3-й степени ( $R^2 = 1$ ). Такая же аппроксимация может быть получена и для сечений игл ( $R^2 = 0,87$ ).

Однако, принимая во внимание важность выбора простого функционального выражения с минимальным количеством неинтерпретируемых параметров [11], подберем для аппроксимации рассматриваемой зависимости более простую модель.

На практике проверили следующие модели:

модель 1

$$\frac{R_{cs}}{W} = \frac{b^a \left[ (W/2)^a + (T/2)^a \right]^{1/a}}{2\pi W};$$

модель 2

$$\frac{R_{cs}}{W} = \frac{2 \left[ (W/2)^a + (T/2)^a \right]^{1/a}}{2\pi W};$$

модель 3

$$\frac{R_{cs}}{W} = \frac{a + 2^2 \left[ (W/2)^2 + (T/2)^2 \right]^{1/2}}{2\pi W}.$$

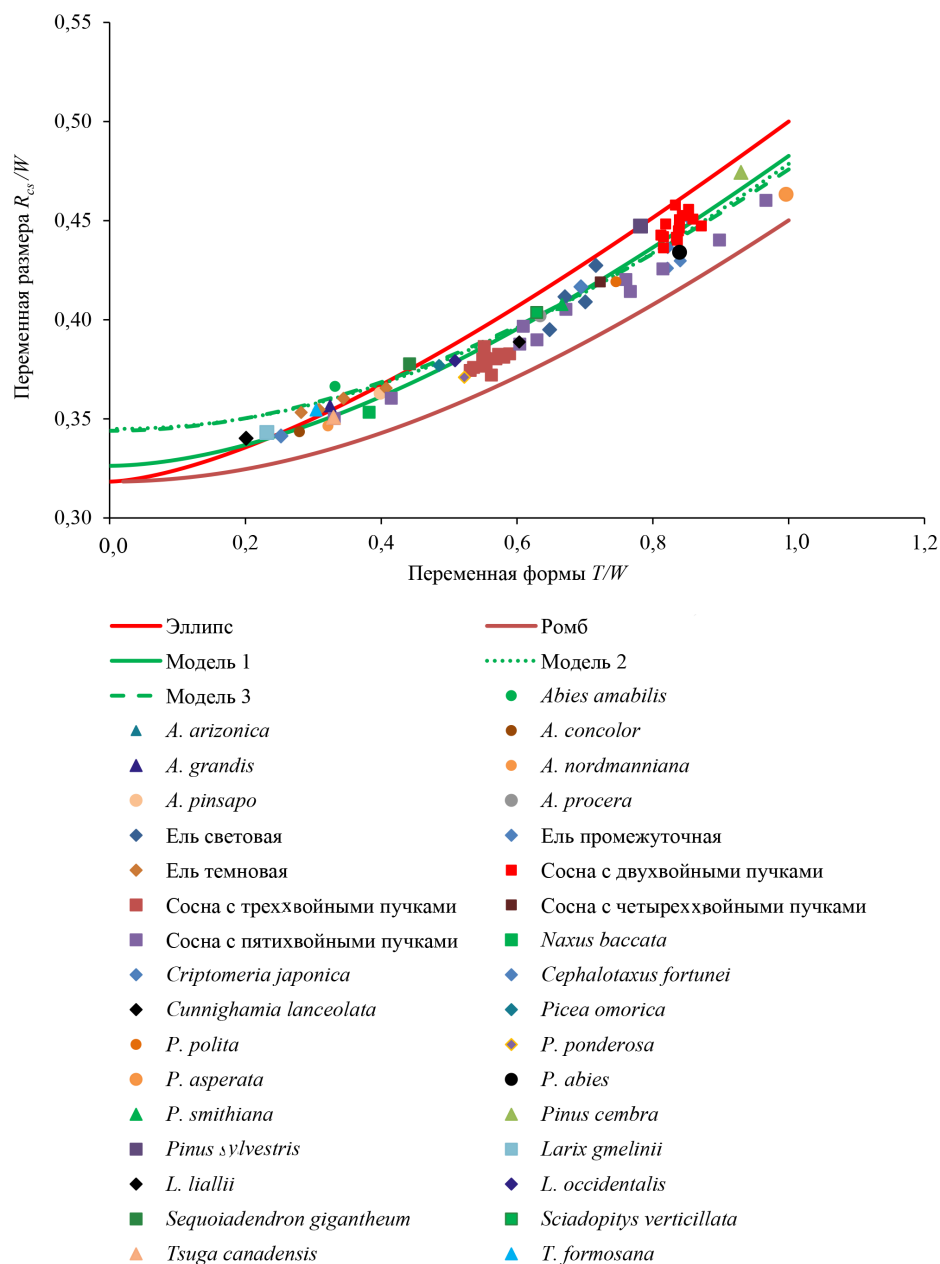


Рис. 8. Зависимость переменной размера от переменной формы для ромба, эллипса и сечений игл хвойных разных видов

Fig. 8. The dependence of the size variable on the shape variable for a rhombus, an ellipse and cross-sections of coniferous needles of different species

Задачу нелинейной оптимизации данных подходящей моделью решали с помощью метода наименьших квадратов. Оценка параметров проводилась для уровня значимости 0,05. В табл. 1–3 приведены результаты нелинейного регрессионного анализа для каждой модели.

Таблица 1

**Результаты регрессионного анализа: описание моделей 1–3**  
**The regression analysis results: the description of models 1–3**

Модель	R	R <sup>2</sup>	Нормированный R <sup>2</sup>	AIC	Стандартная ошибка	Отношение Дурбина–Ватсона
1	0,950	0,903	0,902	–671,834	0,0135	0,566
2	0,944	0,891	0,891	–660,703	0,0142	0,497
3	0,941	0,885	0,885	–654,675	0,0146	0,481

Таблица 2

**Результаты регрессионного анализа: ANOVA для моделей 1–3**  
**The regression analysis results: ANOVA for models 1–3**

Фактор	Модель 1				
	SS	df	MS	F-статистика	P-значение
Регрессия	20,437	2	10,219	529,060	0,001
Остаток	0,021	115	0,00018		
Итого	20,458	117			
Фактор	Модель 2				
	SS	df	MS	F-статистика	P-значение
Регрессия	20,435	1	20,435	941,878	0,001
Остаток	0,0234	116	0,0002		
Итого	20,458	117			
Фактор	Модель 3				
	SS	df	MS	F-статистика	P-значение
Регрессия	20,433	1	20,433	888,804	0,001
Остаток	0,0246	116	0,00021		
Итого	20,458	117			

Таблица 3

**Результаты регрессионного анализа: параметры оценки, t (N–P; 0,05), для моделей 1–3**  
**The regression analysis results: evaluation parameters, t (N–P; 0.05), for models 1–3**

Модель	Коэффициент	Оценка	t-статистика	P-значение	95%-й асимптотический доверительный интервал	
					нижний	верхний
1	a	1,771	19,973	0	1,595	1,946
	b	2,219	33,292	0	2,087	2,351
2	a	2,116	377,715	0	2,105	2,127
3	a	0,161	19,073	0	0,145	0,178

Примечание:  $t(N-P; 0,05) = 1,980808; 1,980626; 1,980626$  для моделей 1, 2 и 3 соответственно. Фактические значения t-критерия сравниваются с табличными (с учетом уровня значимости ( $\alpha = 0,05$ ) и числа степеней свободы (N–P)).

В целом полученный результат подтверждает выдвинутые предположения. Сравнение итоговых данных показало, что модель 1 является лучшей среди рассматриваемых.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для верификации модели поперечного сечения использовали 968 гистологических срезов игл: 634 – пихты и 334 – можжевельника. Основные формы поперечных сечений игл пихты представлены на рис. 9, *a–з*, можжевельника – на рис. 9, *и–р*.

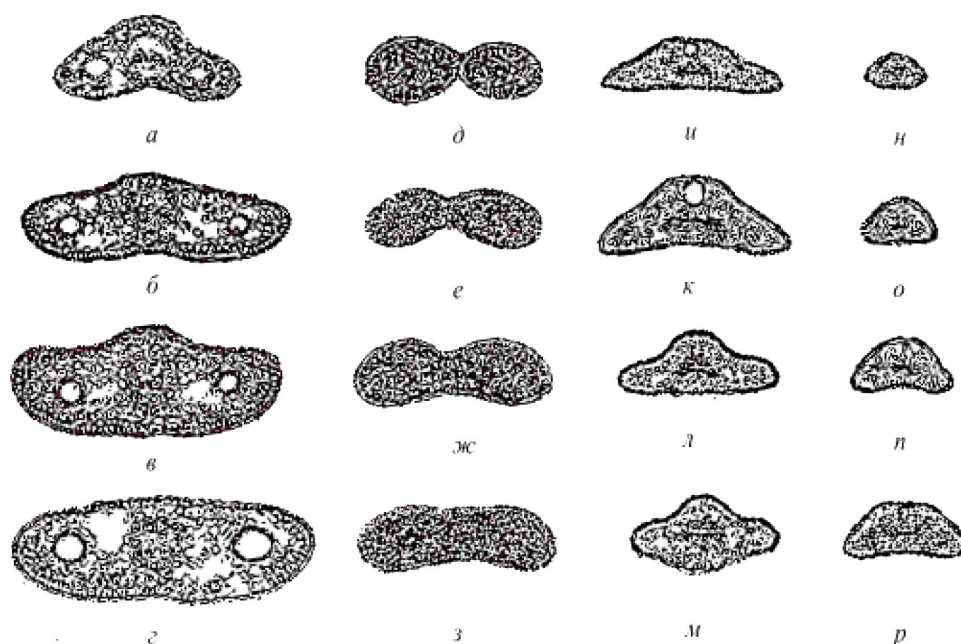


Рис. 9. Формы поперечных сечений игл пихты (*a–з*) и можжевельника (*и–р*)

Fig. 9. Cross-sectional shapes of fir (*a–z*) and juniper (*u–p*) needles

Измеряли периметр ( $P_{r_i}$ ) (далее  $r$  означает принадлежность к эталонному значению, индекс  $m$  – к модели), ширину ( $W_i$ ) и толщину ( $T_i$ ) каждого поперечного сечения игл. Используя полученные значения, определяли эквивалентный радиус ( $R_{r_i} = P_{r_i}/2\pi$ ), переменную размера ( $R_{r_i}/W_i$ ) и переменную формы ( $T_i/W_i$ ). Полученные данные объединяли в одну выборку. Зависимость переменной размера от переменной формы аппроксимировалась моделями 1–3. По результатам нелинейного регрессионного анализа модель 2 была признана лучшей, ее параметры приведены в табл. 4. Диаграмма рассеяния переменных и аппроксимирующая модель показаны на рис. 10.

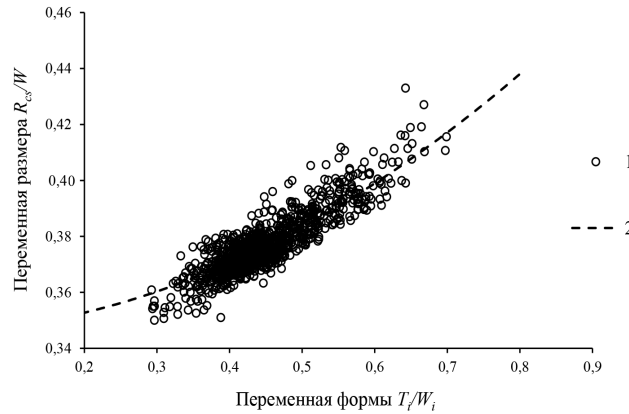
Таблица 4

**Результаты регрессионного анализа для модели 2  
при аппроксимации натуральных данных пихты и можжевельника  
The regression analysis results for Model 2 when approximating the physical data  
of fir and juniper**

Описание модели					
R	R <sup>2</sup>	Нормированный R <sup>2</sup>	AIC	Стандартная ошибка	Отношение Дурбина–Ватсона
0,9991	0,9983	0,9983	-12524	0,00037	2,049
ANOVA					
Фактор	SS	df	MS	F-статистика	P-значение
Регрессия	137,921	1	137,921	575481,054	0,001
Остаток	0,00014	967	0,0000001		
<i>Итого</i>	137,921	968			
Параметры оценки, $t(N-P; 0,05) = 1,980626$					
Коэффициент	Оценка	t-статистика	P-значение	95%-й асимптотический доверительный интервал	
				нижний	верхний
a	2,12893	39930,267	0	2,12883	2,12904

Рис. 10. Зависимость переменной размера от переменной формы для поперечных сечений игл пихты и можжевельника: 1 – экспериментальные данные; 2 – модель 2

Fig. 10. The dependence of the size variable on the shape variable for cross-sections of fir and juniper needles: 1 – experimental data; 2 – model 2



Коэффициент a модели 2, полученный при аппроксимации натуральных данных пихты и можжевельника, статистически значимо отличается от коэффициента a, полученного при предварительной оценке модели. Однако, учитывая размер натурной выборки, основной моделью была выбрана модель 2 с коэффициентом  $a = 2,12893$ :

$$R_{cs} = \frac{2^{2,12893} \left[ (W/2)^{2,12893} + (T/2)^{2,12893} \right]^{1/2,12893}}{2\pi};$$

$$P_{cs} = 2^{2,12893} \left[ (W/2)^{2,12893} + (T/2)^{2,12893} \right]^{1/2,12893} \quad (5)$$

Из доступных нам методов метод аппроксимации длины произвольной кривой кусочно-линейной функцией является самым точным. Если принять значения периметров сечений игл, полученные в результате измерения с помощью программы обработки изображений, как истинные (эталонные) по отношению к значениям, рассчитанным с использованием уравнения (5), то, используя графический анализ Блэнда–Альтмана [9, 10, 19], можно оценить качество определения периметра поперечного сечения иглы с применением уравнения регрессии. Метод Блэнда–Альтмана предполагает наличие парных измерений, поэтому для выполнения анализа по (5) рассчитывали значения периметров  $P_m$ , которые сопоставлялись со значениями периметров, полученными непосредственным измерением  $P_{ri}$ . В результате была сформирована парная выборка  $(P_{ri}, P_{mi})$  числом пар  $n = 914$ , которая анализировалась графическим методом: был построен график рассеяния  $XU$  (рис. 11), в котором по оси  $U$  представлена разница между двумя парными оценками периметров  $(P_{ri} - P_{mi})$ , а на оси  $X$  показано среднее значение этих оценок  $(P_{ri} + P_{mi})/2$ . Результаты анализа сведены в табл. 5 и 6. Часть данных ( $n = 54$ ) была исключена как выбросы. Данные отбрасывались, если отклонение  $(|P_{ri} - P_{mi}| > 2\sigma)$  от среднего значения выборки превышало  $2\sigma (P_{ri} - P_{mi})$ .

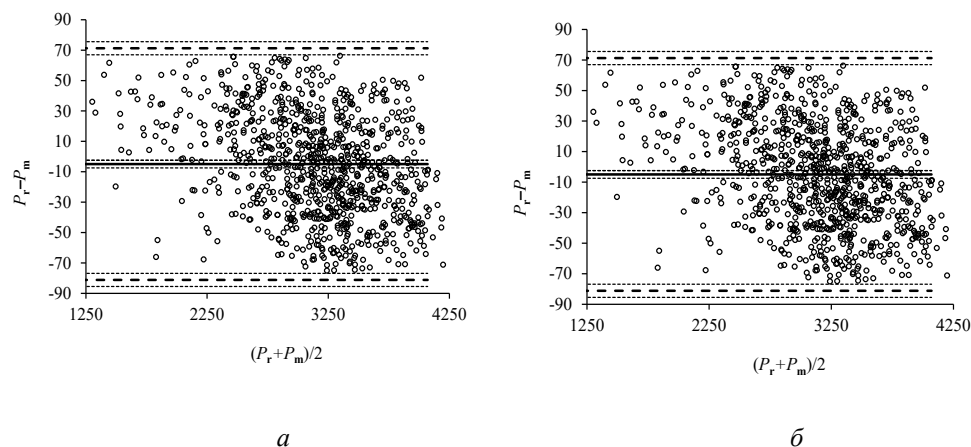


Рис. 11. График различий между методом аппроксимации периметра поперечного сечения иглы кусочно-линейной функцией (метод 1) и методом аппроксимации периметра поперечного сечения иглы модельной функцией (5) (метод 2):  $a$  – выраженных в абсолютных значениях;  $b$  – выраженных в процентах (кружки – исходные данные; сплошная линия – средняя разница; толстая пунктирная – верхний и нижний пределы согласия; тонкая пунктирная – границы 95%-го доверительного интервала)

Fig. 11. The graph of the differences between the method of approximating the needle cross-section perimeter by the piecewise linear function (method 1) and the method of approximating of the needle cross-section perimeter by the model function (11) (method 2):  $a$  – expressed in absolute values;  $b$  – expressed as a percentage (circles – initial data; solid line – mean difference; thick dashed line – upper and lower limits of agreement; thin dashed line – the limits of the 95 % confidence interval)



Таблица 5

**Описательная статистика для методов 1 и 2**  
**The descriptive statistics for methods 1 and 2**

Параметр	n	Среднее	Стандартное отклонение	95%-й доверительный интервал	
				нижняя граница	верхняя граница
Метод 1	914	3117,780011	567,8250176	3080,919137	3154,640885
Метод 2		3122,726348	579,5509297	3085,104276	3160,34842
Разность		-4,946336856	33,94132996	-7,149668959	-2,743004754

Примечание: R = 0,998465419 (95%-й доверительный интервал, CI = 0,994864531–1,002066306, P < 0,001).

Таблица 6

**Анализ Блэнда-Альтмана: смещение и пределы согласия для методов 1 и 2**  
**Bland-Altman plot: bias and limits of agreement for methods 1 and 2**

Параметр	n	Среднее значение	Стандартное отклонение	95%-й доверительный интервал	
				нижняя граница	верхняя граница
<i>Абсолютные значения</i>					
Смещение (разность)	914	-4,946	33,94132996	-7,150	-2,743
Нижняя граница согласия		-71,471	3,684054469	-75,237	-67,703
Верхняя граница согласия		61,579	3,684054469	57,811	65,3443
<i>Относительные значения</i>					
Смещение (разность)	914	-0,070	1,19	-0,158071775	0,018159612
Нижняя граница согласия		-2,734	0,0045	-2,884554881	-2,583260855
Верхняя граница согласия		2,594	0,0045	2,44	2,74

Результаты выборочного теста Колмогорова–Смирнова: расчетное значение критерия (D) – 0,038864793; P-значение (асимптотическое) – 0,1229; при вероятности 0,05 распределение разности является нормальным (P > 0,05).

Анализ показал, что средняя разница между оценками периметра по методам 1 и 2 составляет -0,07 процентных пункта с 95%-м доверительным интервалом (-0,158; 0,018), пределы согласия -2,734 и 2,594 % не превышают 3 %. Таким образом, метод оценки периметра поперечного сечения иглы, осно-

ванный на формуле (5), согласуется с методом кусочно-линейной аппроксимации и является хорошей альтернативой непосредственному измерению периметра поперечного сечения. Если принять метод непосредственного измерения периметра за эталонный, то можно считать, что относительная ошибка оценки периметра поперечного сечения иглы на основе предложенной модели не превышает 3 %.

### Заключение

Предложена методика, которая позволяет на основе измерения параметров поперечного сечения иглы детерминировать переменную размера и переменную формы и сопоставить их. Методика рассчитана на формы поперечных сечений игл, отличающиеся от формы известных геометрических фигур, и ориентирована на аллометрический подход к изучению живых организмов. Методика была апробирована на хвое пихты сибирской и можжевельника обыкновенного, а также на иглоподобных листьях других видов хвойных, параметры которых получены из литературных источников.

Разработанная методика использована для создания модели, аппроксимирующей зависимость переменной размера поперечного сечения иглы от переменной ее формы. Модель позволяет оценивать периметр поперечного сечения иглы по ширине и толщине хвоинки. Достоинства предлагаемой модели: 1) универсальность – модель не является видоспецифичной, 2) точность – модель дает оценку периметра поперечного сечения иглы не хуже, чем метод кусочно-линейной аппроксимации, который в данном случае может рассматриваться как эталонный. Это является немаловажным преимуществом с учетом необходимости знания точных значений площади поверхности листовых органов растений во многих областях научных исследований земных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 292 с.  
Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A. *Surface Area of Forest Plants: Essence, Parameters, Use*. Moscow, Nauka Publ., 2008. 292 p. (In Russ.).
2. Цельникер Ю.Л. Упрощенный метод определения поверхности хвои сосны и ели // Лесоведение. 1982. № 4. С. 85–88.  
Tsel'niker Yu.L. A Simplified Method for Determining the Surface of Pine and Spruce Needles. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1982, no. 4, pp. 85–88. (In Russ.).
3. Цельникер Ю.Л., Ельчина Л.М. Упрощенный метод определения площади поверхности хвои лиственницы // Лесоведение. 1996. № 3. С. 86–91.  
Tsel'niker Yu.L., El'china L.M. A Simplified Method for Determining the Surface Area of Larch Needles. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1996, no. 3, pp. 86–91. (In Russ.).
4. Эзю К. Анатомия семенных растений. М.: Мир, 1980. Кн. 2. 400 с.  
Esau K. *Anatomy of Seed Plants*. Moscow, Mir Publ., 1980, book 2. 400 p. (In Russ.).
5. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. The Use of Multiple Measurement Techniques to Refine Estimates of Conifer Needle Geometry. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 1, pp. 101–105. <https://doi.org/10.1139/x02-166>

6. Bertalanffy von L. Basic Concepts in Quantitative Biology of Metabolism. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 1964, vol. 9, pp. 5–37. <https://doi.org/10.1007/BF01610024>
7. Bookstein F.L. *Morphometric Tools for Landmark Data. Geometry and Biology*. Cambridge University Press, 1992. 435 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511573064>
8. Courant R., Robbins H. *What is Mathematics? An Elementary Approach to Ideas and Methods*. Oxford University Press, 1996. 592 p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195105193.001.0001>
9. Dewitte K., Fierens C., Stöckl D., Thienpont L.M. Application of the Bland-Altman Plot for Interpretation of Method-Comparison Studies: a Critical Investigation of its Practice. *Clinical Chemistry*, 2002, vol. 48, iss. 5, pp. 799–801. <https://doi.org/10.1093/clinchem/48.5.799>
10. Giavarina D. Understanding Bland Altman Analysis. *Biochemia Medica*, 2015, vol. 25, iss. 2, pp. 141–151. <http://dx.doi.org/10.11613/BM.2015.015>
11. Gould S.J. Allometry and Size in Ontogeny and Phylogeny. *Biological Reviews*, 1966, vol. 41, pp. 587–640. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1966.tb01624.x>
12. Katsuno M., Hozumi K. Needle Area Measurement by the Cut Method and Estimation of Specific Leaf Area in *Cryptomeria japonica*. *Ecological Research*, 1987, vol. 2, pp. 203–213. <https://doi.org/10.1007/BF02349774>
13. Kerner H., Gross E., Koch W. Structure of the Assimilation System of a Dominating Spruce Tree (*Picea abies* (L.) Karst.) of Closed Stand: Computation of Needle Surface Area by Means of a Variable Geometric Needle Model. *Flora*, 1977, vol. 166, iss. 5, pp. 449–459. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)32165-5](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)32165-5)
14. Krüssmann G. *Die Nadelgehölze. Eine Nadelholzkunde für die Praxis*. 3rd ed., revised. Berlin, Paul Parey Verlag, 1979. 264 p. (In Germ.).
15. Krüssmann G. *Handbuch der Nadelgehölze*. Berlin, Hamburg, Paul Parey Verlag, 1972. 366 p. (In Germ.).
16. Lin J., Sampson D.A., Deckmyn G., Ceulemans R. Significant Overestimation of Needle Surface Area Estimates Based on Needle Dimensions in Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Canadian Journal of Botany*, 2002, vol. 80, no. 9, pp. 927–932. <https://doi.org/10.1139/b02-081>
17. Maertens R., Rousseau R. Een Nieuwe Benaderde Formule voor de Omtrek van een Ellips. *Wiskunde & Onderwijs*, 2000, vol. 26, pp. 249–258. (In Dutch).
18. Mosimann J.E. Size Allometry: Size and Shape Variables with Characterizations of the Lognormal and Generalized Gamma Distributions. *Journal of the American Statistical Association*, 1970, vol. 65, iss. 330, pp. 930–945. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1970.10481136>
19. NCSS Statisticf Software. Chapter 204. *Bland-Altman Plot and Analysis*. Available at: [https://www.ncss.com/wp-content/themes/ncss/pdf/Procedures/NCSS/Bland-Altman\\_Plot\\_and\\_Analysis.pdf](https://www.ncss.com/wp-content/themes/ncss/pdf/Procedures/NCSS/Bland-Altman_Plot_and_Analysis.pdf) (accessed: 18.04.22)
20. Pólya G., Szegő G. *Isoperimetric Inequalities in Mathematical Physics*. Princeton, Princeton University Press, vol. 27, 1951. 279 p. <https://doi.org/10.1515/9781400882663>
21. Zwillinger D. *CRC Standard Mathematical Tables and Formulas*. Chapman and Hall/CRC Press, 2002. 928 p. <https://doi.org/10.1201/9781420035346>


**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\*181.351  
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-92-106

### Крупные древесные остатки в коренных и вторичных среднетаежных ельниках

*Е.А. Капица*<sup>1</sup> , канд. биол. наук, доц.;  
ResearcherID: [U-9939-2017](https://orcid.org/0000-0002-6729-482X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6729-482X>  
*М.А. Шорохова*<sup>1</sup>, лаборант; ResearcherID: [AEA-6852-2022](https://orcid.org/0000-0002-3323-7229),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3323-7229>  
*Е.В. Моргун*<sup>1</sup>, лаборант; ResearcherID: [CAG-5020-2022](https://orcid.org/0000-0002-6745-6868),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6745-6868>  
*А.А. Корепин*<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [ABN-7483-2022](https://orcid.org/0000-0003-2543-3542),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2543-3542>  
*Е.В. Шорохова*<sup>1,2</sup>, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [T-6181-2017](https://orcid.org/0000-0002-8238-927X),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8238-927X>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; [kapitsa@list.ru](mailto:kapitsa@list.ru) , [maria.shorohova99@gmail.com](mailto:maria.shorohova99@gmail.com), [lucky.demon@bk.ru](mailto:lucky.demon@bk.ru), [aakorepin@yandex.ru](mailto:aakorepin@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт леса Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия, 185910; [shorohova@es13334.spb.edu](mailto:shorohova@es13334.spb.edu)

Поступила в редакцию 08.06.22 / Одобрена после рецензирования 05.09.22 / Принята к печати 07.09.22

**Аннотация.** Восстановление пула крупных древесных остатков после нарушений является одним из механизмов сохранения устойчивости лесных биогеоценозов. Исследование крупных древесных остатков проводили в резервате «Вепский лес» Ленинградской области на 8 пробных площадях, заложенных в коренных лесах (4 пробные площади) и во вторичных лесах 1-й генерации после рубки древостоя в 1973–1974 гг. (4 пробные площади), где состав и структура насаждения, а также лесорастительные условия были идентичны условиям в коренных лесах. Учет крупных древесных остатков осуществляли на трансектах. Запасы крупных древесных остатков в коренных древостоях варьировали от 104 до 233 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>. Преобладали валеж и зависшие деревья. Доля сухостоя как в коренных, так и во вторичных лесах невысока. Сплошная рубка значительно изменила не только запас крупных древесных остатков, но и их распределение по классам разложения и категориям субстрата. Запасы крупных древесных остатков во вторичных лесах варьировали от 8 до 40 м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup> и были представлены в основном пнями. Крупные древесные остатки 4–5-го классов разложения почти отсутствовали в коренных лесах, в то время как во вторичных доля оставшейся после рубки сильноразложившейся древесины составила около 50 %. Соотношение запасов крупных древесных остатков и древостоя равнялось в среднем 1:1 и 1:5 в биогеоценозах коренных и вторичных лесов соответственно. Годичный баланс углерода крупных древесных остатков (разница потоков в связи с отпадом древостоя и разложением крупных древесных остатков) варьировал от 0,40 до 2,80 т С·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>, составив в среднем 1,75 и 0,63 т С·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> во вторичных и в коренных лесах соответственно. Положи-

тельный годичный углеродный баланс крупных древесных остатков обусловлен преобладанием скорости отпада древостоя над скоростью разложения крупных древесных остатков в результате ветровальных нарушений в коренных лесах и лесах в результате самоизреживания древостоя – во вторичных.

**Ключевые слова:** старовозрастный лес, вторичный лес, ельник, древесный детрит, отпад древостоя, разложение древесины

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-26-00177). Авторы выражают глубокую признательность одному из родоначальников исследований на территории «Вепского леса» В.Н. Федорчуку за идейное руководство и вдохновение, а также всем коллегам, принимавшим участие в полевых и организационных работах, в особенности А.А. Шорохову, С.В. Тетюхину, А.А. Шварц, М.Л. Кузнецовой, Г.В. Филиппову, А.А. Гладышеву, И.П. Коготько, Д.М. Докучаеву †, А.М. Иванову.

**Для цитирования:** Капица Е.А., Шорохова М.А., Моргун Е.В., Корепин А.А., Шорохова Е.В. Крупные древесные остатки в коренных и вторичных среднетаежных ельниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 92–106. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-92-106>

Original article

## Coarse Woody Debris in Primary and Secondary Middle Taiga Spruce Forests

*Ekaterina A. Kapitsa*<sup>1</sup>✉, Candidate of Biology, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [U-9939-2017](https://orcid.org/0000-0002-6729-482X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6729-482X>

*Mariya A. Shorokhova*<sup>1</sup>, Laboratory Assistant; ResearcherID: [AEA-6852-2022](https://orcid.org/0000-0002-3323-7229),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3323-7229>

*Elizaveta V. Morgun*<sup>1</sup>, Laboratory Assistant; ResearcherID: [CAG-5020-2022](https://orcid.org/0000-0002-6745-6868),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6745-6868>

*Aleksandr A. Korepin*<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABN-7483-2022](https://orcid.org/0000-0003-2543-3542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2543-3542>

*Ekaterina V. Shorokhova*<sup>1,2</sup>, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [T-6181-2017](https://orcid.org/0000-0002-8238-927X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8238-927X>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; [kapitsa@list.ru](mailto:kapitsa@list.ru)✉, [maria.shorokhova99@gmail.com](mailto:maria.shorokhova99@gmail.com), [lucky.demon@bk.ru](mailto:lucky.demon@bk.ru), [aakorepin@yandex.ru](mailto:aakorepin@yandex.ru)

<sup>2</sup>Forest Research Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; [shorokhova@ES13334.spb.edu](mailto:shorokhova@ES13334.spb.edu)

Received on June 8, 2022 / Approved after reviewing on September 5, 2022 / Accepted on September 7, 2022

**Abstract.** Restoration of the pool of coarse woody debris after disturbances is one of the mechanisms for maintaining the stability of forest biogeocenoses. The studies of coarse woody debris have been carried out in the “Vepssky Forest” Reserve in the Leningrad Region on 8 sample plots established in primary forests (4 sample plots) and in secondary forests of the 1st generation after logging in 1973–1974 (4 sample plots), where the composition and structure of the stand, as well as the site conditions have been identical to those in primary fo-



rests. The coarse woody debris has been inventoried on transects. The stocks of coarse woody debris in primary stands have ranged from 104 to 233 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Windfall and leaning trees have prevailed. The proportion of deadwood in both primary and secondary forests has been low. Clear cutting has significantly changed not only the stock of coarse woody debris, but also its distribution by decay classes and substrate categories. The stocks of coarse woody debris in secondary forests have ranged from 8 to 40 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, and have been mainly represented by stumps. The coarse woody debris of the 4th and 5th decay classes has almost been absent in primary forests, while in secondary forests the proportion of highly decomposed wood remaining after cutting has been about 50 %. The ratio of coarse woody debris and growing stocks has been on average 1:1 and 1:5 in the biogeocenoses of primary and secondary forests, respectively. The annual carbon balance of coarse woody debris (the difference in fluxes due to the loss of growing forest and the decay of coarse woody debris) has ranged from 0,40 to 2,80 t C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, averaging 1,75 and 0,63 t C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in secondary and primary forests, respectively. The positive annual carbon balance in the coarse woody debris is due to the predominance of the rate of the loss of growing forest over the rate of the decay of coarse woody debris in primary forests as a result of wind disturbances and as a result of self-thinning of the stand in secondary forests.

**Keywords:** old-growth forest, secondary forest, spruce forest, woody detritus, loss of growing forest, wood decay

**Acknowledgements:** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-26-00177). The authors express their deep gratitude to V.N. Fedorchuk, one of the pioneers of research on the territory of the “Vepssky Forest”, for his ideological guidance and inspiration, as well as to all the colleagues who participated in field and organizational work, especially to A.A. Shorokhov, S.V. Tetyukhin, A.A. Shvarts, M.L. Kuznetsova, G.V. Filippov, A.A. Gladyshev, I.P. Kogot’ko, D.M. Dokuchaev† and A.M. Ivanov.

**For citation:** Kapitsa E.A., Shorokhova M.A., Morgun E.V., Korepin A.A., Shorokhova E.V. Coarse Woody Debris in Primary and Secondary Middle Taiga Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 92–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-92-106>

### Введение

Лес является открытой системой, способной быстро восстанавливать свои параметры после незначительных естественных нарушений. Антропогенное вмешательство в виде сплошных рубок приводит к сильным изменениям как в горизонтальной, так и в вертикальной структуре биogeоценоза [5, 7]: большая часть фитомассы изымается из лесной экосистемы, оставшаяся часть, представленная главным образом живым напочвенным покровом, также подвергается значительным изменениям [6]. В ходе сукцессии меняется породный состав древостоя: увеличивается доля лиственных пород (при естественном возобновлении вырубки); на участках, где произошло сильное нарушение почвенного покрова лесозаготовительной техникой, в травяно-кустарничковом ярусе появляются нетипичные для сомкнутого древостоя виды-пионеры, снижаются общее покрытие и видовое разнообразие мохово-лишайникового яруса; происходят долгосрочные изменения гидрологического режима; сокращаются запасы и меняется скорость круговорота биогенных элементов; изменяются запасы, скорость разложения и структурное разнообразие древесных остатков. На данный момент сплошная рубка остается в России основным способом лесозаготовки, ее доля составляет более 70 % от площадей рубки [14].

Крупные древесные остатки (КДО) – валеж, зависшие стволы, пни, сухостой и крупные ветви диаметром более 6 см – являются важным фактором устойчивости лесной экосистемы и обеспечения доступности минеральных элементов для лесной растительности, непрерывного круговорота веществ между почвой и фитоценозом [5, 17, 18]. Объемы КДО в коренных лесах могут достигать  $1200 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [4]. Накопление КДО зависит от скорости их поступления в экосистему в результате отпада древостоя, а также от скорости разложения. В ненарушенных хозяйственной деятельностью лесах присутствуют КДО всех классов разложения и категорий субстрата. Запасы ветровальных и буреломных деревьев чаще всего превышают запасы сухостоя [11]. При интенсивном ведении лесного хозяйства объем и доля КДО в общей биомассе вторичных лесов минимальны до возраста рубки, общий объем КДО редко превышает  $10 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [15].

Наличие КДО разных классов разложения и категорий отпада (сухостой, ветровал, бурелом, пни, крупные ветви) с высокой вариабельностью как физических, так и химических характеристик субстрата обеспечивает постоянство экологических ниш для ассоциированных с КДО видов живых организмов, тем самым играя важную роль в сохранении биоразнообразия. Например, в государственном национальном парке «Беловежская пуща» было найдено 75 видов мхов и 24 вида печеночников, ассоциированных с КДО [15]. В таежных лесах КДО являются важнейшим местообитанием для сотен видов грибов и беспозвоночных [15, 21]. Некоторые виды короедов (*Scolytidae*), усачей (*Cerambycidae*) и долгоносиков (*Curculionidae*) заселяют мертвую древесину сразу после отмирания дерева, и для них КДО первых классов разложения – значимая экологическая ниша [21]. Например, в результате исследований в Баварии, только на КДО ели было найдено 173 вида жесткокрылых и 181 вид двукрылых [15]. Многие из беспозвоночных маломобильны, отсутствие КДО может привести к снижению их численности или полному исчезновению из эксплуатируемых лесных экосистем.

КДО способствуют возобновлению древесных растений. В лесных сообществах с избыточным увлажнением – в сфагновых и долгомошных ельниках – около 90 % подроста ели приурочено к разлагающейся древесине и микроповышениям [9]. Размер КДО имеет ключевое значение при возобновлении деревьев: наиболее подходит валеж диаметром больше 20 см [9], в качестве субстрата для заселения грибов и других организмов также предпочтительнее оказываются более крупные стволы деревьев [16].

Цель исследования – сравнить запасы, структурное разнообразие и роль КДО в углеродном балансе в коренных и во вторичных лесах 1-й генерации [2] на примере ельников природного парка «Вепсский лес». В задачи исследования входило сопоставление: 1) запаса и распределения КДО по категориям (сухостой, валеж, зависшие деревья, пни), древесным породам и классам разложения; 2) соотношений запасов КДО и древостоя; 3) годичного углеродного баланса КДО. Тестировали гипотезы о: 1) более низких объемах и структурном разнообразии КДО во вторичных таежных лесах по сравнению с коренными; 2) преобладании сильно разложившихся КДО (4–5-го классов разложения) во вторичных лесах и равномерном распределении КДО по классам разложения в коренных; 3) высокой доле сухостойных деревьев низкого диаметра во вторичных лесах вследствие самоизреживания древостоя; 4) положительном годичном углеродном балансе КДО во вторичных лесах и близком к 0 – в коренных.

## Объекты и методы исследования

Исследование проводили в 2021 г. в резервате «Вепсский лес» одноименного природного парка, расположенного на Вепсовской возвышенности в Балтийско-Белозерском таежном районе ( $60^{\circ}12'19,8''$  с. ш.  $35^{\circ}08'04,7''$  в. д.). Массив коренных, преимущественно еловых, лесов и примыкающий к нему массив вторичных лесов, возникших на месте сплошных рубок 1970–1980-х гг., расположены на приподнятом участке древнего карбонового плато с высотой над уровнем моря 220–260 м. Преобладают дренированные почвы на моренных суглинках; гумусовый горизонт чаще почти отсутствует, широко распространены заболоченные и болотные торфяные почвы [10]. Среднегодовая температура воздуха составляет  $+2,8^{\circ}\text{C}$  (за период с 1950 по 2021 гг.), среднегодовое количество осадков – 750 мм.

Данные собраны на 8 постоянных пробных площадях (ПП), заложенных в коренных и производных лесах 1-й генерации (вторичных) (рис. 1, табл. 1). Согласно плану эксперимента, разработанному сотрудниками Научно-исследовательского института лесного хозяйства В.Н. Федорчуком и С.А. Дыренковым, для участков в ненарушенной части массива резервата были подобраны близкие по лесорастительным и почвенным условиям вырубки в его буферной зоне (рис. 1). Рубки древостоев с оставлением семенников ели проведены в 1973–1974 гг. Порубочные остатки, в т. ч. низкокачественная стволовая древесина осины, оставлены на вырубке; напочвенный покров сильно поврежден, частично удалены подстилка, кустарнички черники и брусники [8].

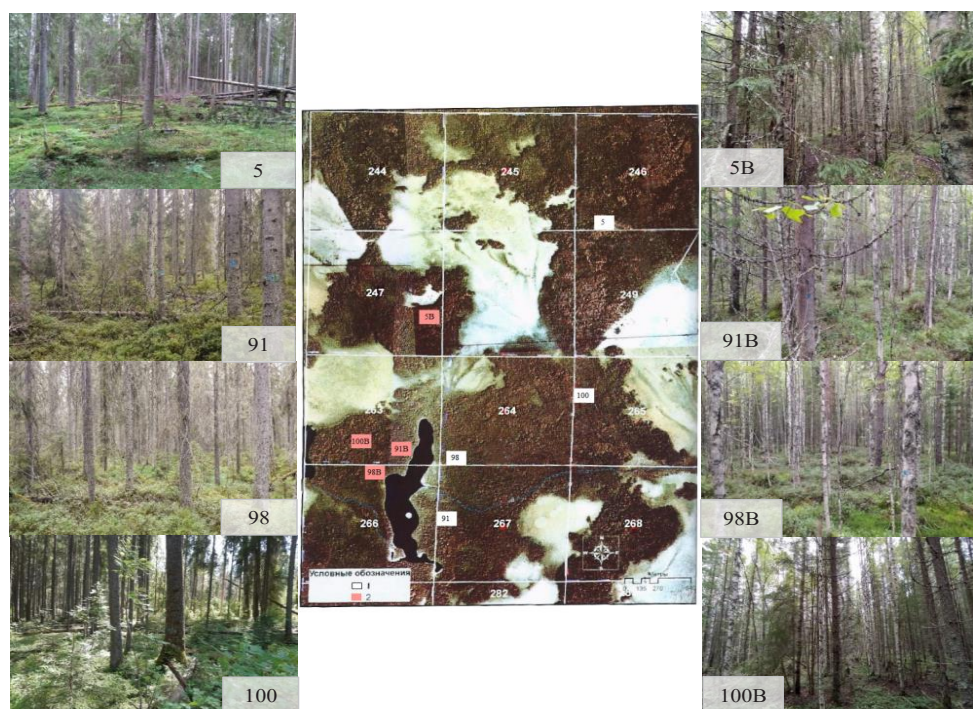


Рис. 1. Схема размещения и фотографии ПП на территории резервата «Вепсский лес»: 1 – коренной древостой; 2 – вторичный древостой

Fig. 1. The layout and photos of the SPs on the territory of the “Vepssky Forest” Reserve: 1 – primary stand; 2 – secondary stand



Таблица 1

**Характеристика ПП**  
**The characteristics of the SPs**

ПП	Год закладки / площадь, га	Координаты (с. ш.; в. д.)	Тип леса, почва / возрастная струк- тура древостоя / фаза динамики древостоя	Состав древостоя	Запас древостоя в год послед- него учета, м <sup>3</sup> ·га <sup>-1</sup>
<i>Коренной древостой, год учета – 2019</i>					
5	1977/0,55	60°13'451" 35°10'368"	Черн. / У.о / 1	7E <sub>140</sub> 3B <sub>140</sub> +C <sub>140</sub>	272,6
91	1973/0,47	60°12'079" 35°08'823"	СФЧ / А.р / 1	9E <sub>80-360</sub> 1B <sub>80-160</sub>	248,6
98	1973/0,46	60°12'378" 35°08'891"	СФЧ / А.р / 1	9E <sub>80-340</sub> 1B <sub>140</sub>	235,7
100	1973/0,78	60°12'683" 30°10'12"	Черн. / У.о / 1	1-й ярус: 6Ос <sub>140</sub> 3С <sub>140-180</sub> 1B <sub>140</sub> +E <sub>140</sub> 2-й ярус: 10E <sub>140</sub>	460,1
<i>Вторичный древостой, год учета – 2021</i>					
5В	1974/0,28	60°13'018" 35°08'854"	Черн. / У.о / 3	6E <sub>48</sub> 3B <sub>48</sub> 1Ос <sub>48</sub>	363,4
91В	1974/0,50	60°12'395" 35°08'405"	СФЧ / У.о / 3	6E <sub>48</sub> 3B <sub>48</sub> 1C <sub>48</sub>	211,0
98В	1973/0,47	60°12'390" 35°08'402"	СФЧ / У.о / 3	5B <sub>49</sub> 3C <sub>49</sub> 2E <sub>49</sub>	248,2
100В	1974/0,83	60°12'451" 35°08'44"	Черн. / У.о / 3	4B <sub>48</sub> 3E <sub>48</sub> 3Ос <sub>48</sub> ед. C <sub>48</sub>	354,6

Примечание: Черн. – черничный на дренированных суглинках и двучленных наносах; СФЧ – сфагново-черничный на слабодренированных местообитаниях и переходных торфах [10]; А.р – абсолютно разновозрастный древостой; У.о – условно одновозрастный [11]; фазы возрастной динамики: 1 – зрелость; 3 – нарастание запаса древостоя [11]; Е – ель (*Picea abies* (L.) Н. Karst); Б – береза (*Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh.); Ос – осина (*Populus tremula* L.); С – сосна (*Pinus sylvestris* L.). Формула породного состава древостоя рассчитана исходя из данных сплошного перечета древостоя на ПП в 2019–2021 гг., возраст коренного древостоя указан по данным [10].

КДО (подземную часть стволовой древесины в исследовании не оценивали) на ПП учитывали на 2 взаимно перпендикулярных трансектах шириной по 4 м, заложенных параллельно границам ПП. При учете КДО фиксировали древесную породу и класс разложения. Для валежа и зависших деревьев измеряли диаметр на высоте 1,3 м и в месте пересечения ходовой линии; для сухостоя – диаметр на уровне 1,3 м и высоту; для пней – диаметры основания и вершины, высоту. Для КДО всех категорий субстрата определяли класс разложения согласно классификации Е.В. Шороховой и А.А. Шорохова [13].

Объем пней рассчитывали по формуле усеченного конуса. Для вычисления объема сухостойных деревьев умножали площадь сечения ствола на высоте 1,3 м на видовую высоту. Для расчета запаса валежа и зависших деревьев использовали формулу [23]

$$V = (\pi^2/8 \sum d_i^2 S) / \sum L_j,$$

где  $V$  – объем КДО данного класса разложения,  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $d_i$  – диаметр дерева в месте пересечения ходовой линии, см;  $S$  – площадь учетной площадки,  $S = 1$  га;  $L_j$  – длина ходовой линии, м.

Все объемы суммировали по породам, категориям субстрата и классам разложения.

Для определения массы углерода КДО их объем по породам умножали на базисную плотность согласно разработанной системе классов разложения. Массу углерода других фракций (корней, ветвей, коры) вычисляли с помощью конверсионных коэффициентов [3] и потери массы, соответствующей средней продолжительности разложения для каждого класса по моделям для древесины и коры с учетом фрагментации [20].

Поток углерода, связанный с отпадом древостоя, в коренных лесах рассчитывали по данным, собранным на ПП за разные периоды. Во вторичных лесах отпад определяли исходя из запаса древостоя, доли текущего отпада [1] и породы. Отпад ( $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ) умножали на базисную плотность древесины по породам. Для вычисления отпада по фитомассе корней и ветвей отпад по запасу для пород умножали на соответствующие конверсионные коэффициенты. Отпад коры по фитомассе получали умножением отпада коры по объему для пород (составляющего определенную часть от прироста по запасу стволовой древесины) на базисную плотность коры. Общий отпад древостоя по фитомассе находили как сумму отпада стволовой древесины, ветвей, корней и коры. При этом фитомассу в миллиграммах на гектар переводили в миллиграмм углерода на гектар с коэффициентом 0,5.

Для оценки потока углерода, связанного с ксилолизом, использовали данные о распределении КДО по породам, классам разложения и категориям, конверсионные коэффициенты и модели ксилолиза КДО по фракциям [20]. Принимали долю прикрепленных ветвей для 1-го класса разложения равной 100 %, для 2-го и 3-го – 50 %, для 4-го и 5-го – 0 %. Поток углерода рассчитывали как разность процента потери массы данной фракции конкретного класса разложения породы, умноженного на запас углерода, за 1 год, прошедший со среднего времени для класса разложения.

Характеристики древостоя получали с использованием стандартных методов таксации на основании регулярных, с периодичностью в 5 лет, перечетов деревьев по породам и элементам леса (ярусам) и (или) возрастным группам. Возраст основных поколений деревьев определяли глазомерно с уточняющим бурением 2–3 деревьев у шейки корня.

Результаты исследования и их обсуждение

Общий запас КДО. Во вторичных лесах запас КДО, составив в среднем 19,9 (9,2...43,0) м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup>, оказался значительно ниже по сравнению с коренными лесами, где он был 152,4 (103,5...233,1) м<sup>3</sup>·га<sup>-1</sup> (рис. 2).

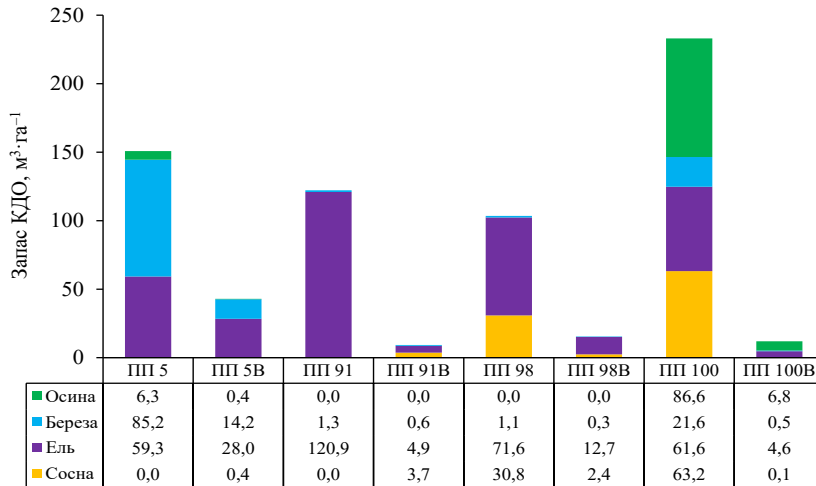


Рис. 2. Распределение запаса КДО по породам в коренных и вторичных древостоях  
 Fig. 2. The distribution of the CWD stock by species in primary and secondary stands

КДО вторичных лесов образованы в основном в результате текущего низового отпада деревьев небольшого диаметра вследствие самоизреживания древостоев. На ПП 5В запас КДО выше, чем в других вторичных лесах, за счет стволов 1-го класса разложения и сильноразложившихся КДО (5-го класса разложения), оставшихся от исходного древостоя.

Запас КДО на ПП 100 на 46,1 % выше, чем на других ПП, это связано с высокой долей осины в отпаде. Старовозрастные осины в большинстве поражены стволовой гнилью, а высокая парусность кроны и масса ствола в сочетании с его сниженной прочностью повышают риск слома деревьев при сильном ветре.

Породный состав КДО на ПП по данным сплошного перечета древостоя в 2019–2021 гг. следующий:

- ПП 5.....5Е4Б1Ос
- ПП 91.....10Е+Б
- ПП 98.....7Е3С+Б
- ПП 100.....4Ос3С2Е1Б
- ПП 5В.....7Е3Б+Ос+С
- ПП 91В.....5Е4С1Б
- ПП 98В.....8Е2С+Б
- ПП 100В.....6Ос4Е+Б+С

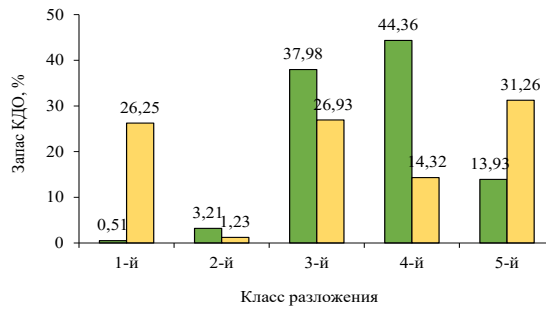
При сплошнолесосечном хозяйстве вариабельность запасов КДО в средневозрастных/спелых древостоях обычно незначительна и во многом определяется лесорастительными условиями и породным составом насаждений. По данным N. Puletti et al. [19], средний запас КДО в таежных лесах Европы составляет  $10,7 \pm 1,9 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ , что в 2 раза ниже, чем во вторичных лесах природного парка «Вепский лес». Следует учесть, что в природном парке не проводили рубок ухода и естественный отпад древостоя пополнял запас КДО. Наши данные оказались также выше значений, полученных А.З. Швиденко с соавторами для лесов с интенсивным ведением лесного хозяйства, в которых запас КДО изменялся в пределах  $6\text{--}15 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [12], и данных финских коллег – по их сведениям, вариабельность запасов КДО в древостоях возраста 70–80 лет составляла  $10\text{--}17 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [22]. Одновозрастная структура древостоя, формирующаяся при сукцессии после сплошной рубки древостоя, в совокупности с наличием в интенсивно эксплуатируемых лесах рубок ухода не предполагают значительного увеличения доли КДО за счет отпада. К 70–80 годам КДО предыдущего поколения древостоя уже полностью переходит в подстилку, а новый отпад формируется в незначительном количестве, что в итоге создает разрыв в присутствии доступного для обитания ксилофильных организмов субстрата и приводит к сокращению биологического разнообразия.

Полученные нами данные по запасам КДО в старовозрастных лесах близки к оценкам для Финляндии и Швеции, где запас КДО в лесах той же возрастной стадии варьирует от 19 до  $201 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [22], а также к результатам для национального парка «Кенозерский», расположенном в средней подзоне тайги, –  $135\text{--}432 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  [4]. Оконная динамика, характерная для еловых лесов таежной зоны, обеспечивает постоянное присутствие валежной древесины в лесном насаждении, что способствует поддержанию его экосистемных функций. Наиболее эффективным мероприятием при реализации краткосрочной стратегии управления лесами для увеличения структурного разнообразия в управляемых лесах было бы проведение лесозаготовки с сохранением КДО больших диаметров и крупных деревьев из предыдущего древостоя.

*Распределение запасов КДО по классам разложения.* Распределение запасов КДО по классам разложения во всех вторичных лесах схоже: относительно равномерное по первым трем классам разложения и высокая доля 4-го и 5-го классов разложения (остатки исходного древостоя). Так, запасы КДО на ПП 91В и 98В 1, 2 и 3-го классов разложения составили 8,7; 13,0; 4,0 и 1,2; 13,0; 23,0 % соответственно; доли 4-го и 5-го классов разложения – 32,1; 42,2 и 39,5; 23,3 % соответственно.

В более богатых лесорастительных условиях коренных лесов (ПП 100) преобладают КДО 1-го и 2-го классов разложения (92,6 %), формирующиеся за счет отпада перестойных деревьев 1-го яруса. КДО 4–5-го классов разложения в коренных лесах почти отсутствуют, в то время как во вторичных доля оставшейся после рубки сильноразложившейся древесины составляет примерно 50 % (рис. 3).

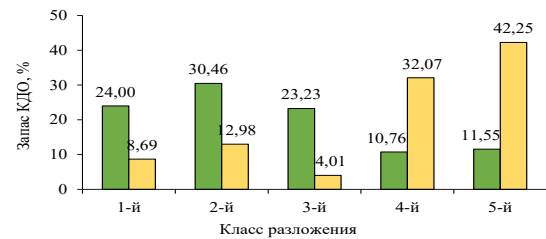
На 80 % территории ПП 5 КДО представлены 3-м (38,0 %) и 4-м (44,4 %) классами разложения. Доли КДО 1-го и 2-го классов минимальны и суммарно составляют 3,7 % (рис. 3).



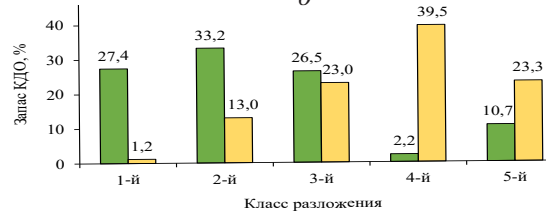
a

Рис. 3. Распределение запаса КДО по классам разложения в коренных и вторичных лесах на ПП: а – 5 и 5В; б – 91 и 91В; в – 98 и 98В; г – 100 и 100В

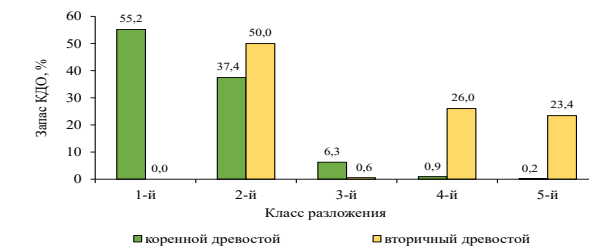
Fig. 3. The distribution of the CWD stock by decay classes in primary and secondary forests on the SPs: а – 5 and 5В; б – 91 and 91В; в – 98 and 98В; г – 100 and 100В



б



в



г

Распределение запасов КДО по категориям субстрата. Во вторичных лесах ПП 91В, 98В, 100В КДО представлены главным образом пнями – в среднем 70,8 (55,4...78,6) %. Запас зависших деревьев и валежа значительно меньше (рис. 4). Так, на ПП 91В валеж полностью отсутствует, а доля зависших деревьев составляет всего 17,8 %; на ПП 98В противоположная ситуация: зависшие деревья отсутствуют, а доля валежа равна 20,2 %. Исключением является ПП 5В, на которой формирование валежа (54,3 %) является результатом частых ветровалов.

Доля сухостоя как в коренных, так и во вторичных лесах невысока. Исключением являются биогеоценозы (БГЦ) в богатых лесорастительных условиях (ПП 100 и 100В). В коренном древостое (ПП 100), находящемся в стадии деградации, происходит усыхание на корню перестойных, ослабленных деревьев,

активную роль в гибели которых играют дереворазрушающие грибы и насекомые. Во вторичном лесу (ПП 100В) основной причиной усыхания является конкуренция деревьев за свет и питательные вещества.

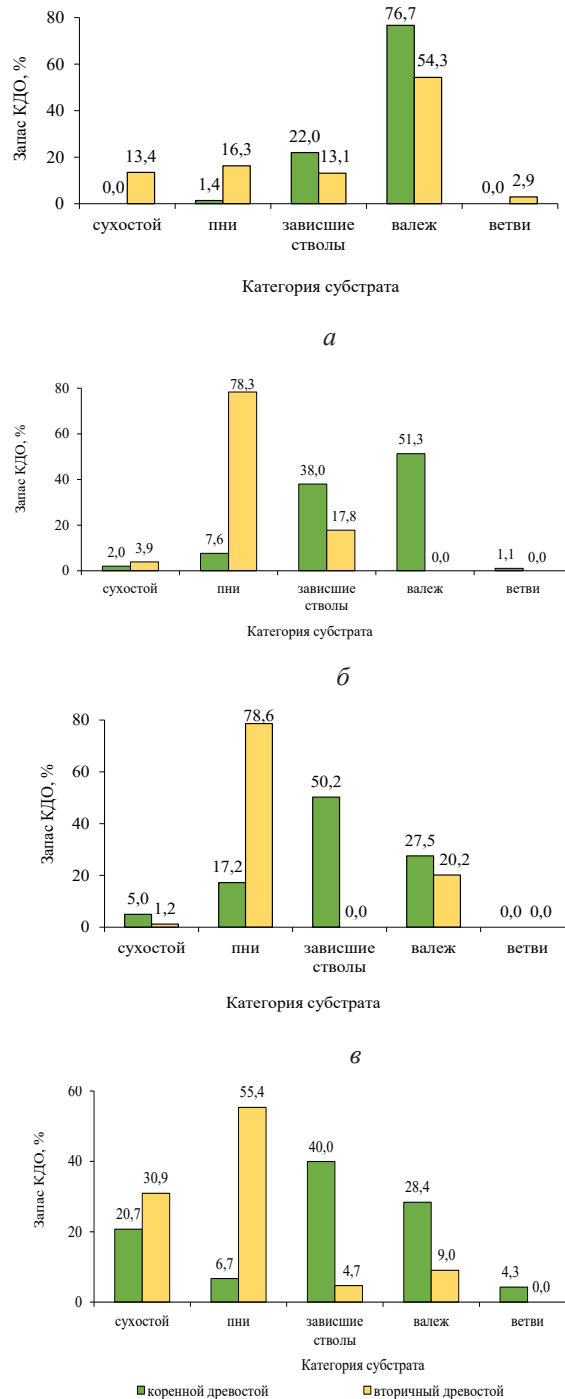


Рис. 4. Распределение запаса КДО по категориям субстрата в коренных и вторичных лесах на ПП: *а* – 5 и 5В; *б* – 91 и 91В; *в* – 98 и 98В; *г* – 100 и 100В

Fig. 4. The distribution of the CWD stock by substrate categories in primary and secondary forests on the SPs: *a* – 5 and 5В; *б* – 91 and 91В; *в* – 98 and 98В; *г* – 100 and 100В

В старовозрастных лесах от 68 до 97 % КДО приходится на долю валежа и зависших стволов, пней немного (не более 17 %). Преобладание валежной стволовой древесины в КДО типично. Так, в лесах Финляндии она составляет около 70 % объема КДО, 23 % представлено сухостоем и 7 % – крупными ветвями [22]. Незначительное число пней в старовозрастных ельниках является отличительной чертой еловых сообществ финальных стадий сукцессии. Гибель деревьев ели по ряду причин (поверхностная корневая система, приуроченность к богатым, местами переувлажненным участкам, внушительная масса надземной части), наиболее вероятно, происходит из-за ветровала с образованием ветровально-почвенных комплексов с зависшими стволами.

*Динамика запасов древостоя и КДО.* В годы учета 1997–2004 запас древостоя в коренных лесах значительно преобладал над запасом КДО (табл. 2). В последующие 20 лет восстановительной динамики объема КДО и древостоя на всех ПП приблизительно выровнялись и на данный момент находятся в соотношении 1:1 (учет 2021 г.). Причем значительная часть представлена КДО 1–2-го классов разложения, что является признаком древостоев, находящихся в фазе дигрессии или прошедших ее.

Таблица 2

**Динамика запасов древостоя и КДО**  
**The dynamics of growing stock and CWD**

ПП	Общий запас КДО, м <sup>3</sup> ·га <sup>-1</sup> , в 1997–2004 гг.* / 2021 г.	Доля КДО 1–2-го классов разложения, %, в 1997–2004 гг.* / 2021 г.	Соотношение запасов КДО и древостоя, в 1997–2004 гг.* / 2021 г.
5	135 / 151	31 / 4	25:75 / 55:45
91	140 / 122	64 / 54	35:65 / 49:51
98	59 / 104	36 / 61	21:79 / 44:56
100	181 / 233	56 / 93	27:73 / 51:49
5В	– / 43	– / 12	– / 11:89
91В	– / 9	– / 2	– / 4:96
98В	– / 16	– / 2	– / 6:94
100В	– / 12	– / 6	– / 3:97

\* По данным В.Н. Федорчука и др. [11].

*Годичный баланс углерода КДО.* Годичный баланс углерода КДО (разница потоков углерода в связи с отпадом древостоя и разложением КДО) варьировал от 0,40 до 2,80 т С·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> (рис. 5). Наибольшие значения были на ПП 91 и 100, что обусловлено высоким запасом на этих участках КДО 1-го и 2-го классов разложения. Средние значения годичного баланса углерода (отпад древостоя – разложение КДО) составили 1,75 и 0,63 т С·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> для вторичных и коренных лесов соответственно.

Среди факторов, контролирующих динамику углеродного пула КДО в БГЦ, можно выделить следующие: 1) естественное старение деревьев, нарушения: пожары, массовые или единичные ветровалы, усыхание; 2) самоизреживание древостоя на этапе молодняка или жердняка; 3) способ и качество уборки порубочных остатков, а также наличие и качество лесохозяйственных мероприятий после рубки. В БГЦ коренных лесов, находящихся в фазах нарастания и стабилизации запаса, независимо от возрастной структуры древостоя, значение

годового баланса потоков углерода немного выше 0, что характеризует медленное нарастание пула углерода КДО: эмиссия углерода при ксиллизе не превышает отпад древостоя. В БГЦ, находящихся в фазе дигрессии, баланс пула углерода КДО отрицателен, что связано с эмиссией углерода в атмосферу [4]. Положительный годичный углеродный баланс на исследованных нами ПП в коренном лесу объясняется естественной возрастной динамикой древостоев; во вторичных лесах – самоизреживанием древостоев.

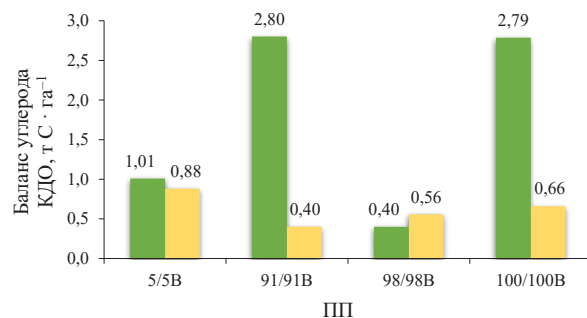


Рис. 5. Годичный баланс углерода КДО на ПП в коренных и вторичных лесах  
Fig. 5. The annual carbon balance of CWD on the SPs in primary and secondary forests

### Заключение

В результате исследования запасов крупных древесных остатков в коренных и вторичных еловых древостоях получены данные о распределении крупных древесных остатков по породам, категориям (сухостой, валеж, зависшие деревья, пни) и классам разложения. Запас крупных древесных остатков в коренных древостоях в 3 и более раз превышает показатель для вторичных лесов. Породный состав крупных древесных остатков почти везде отражает породный состав древостоя, в ряде случаев происходит «выбывание» пионерных лесообразующих древесных видов (сосны, березы и осины), т. е. их переход в мортмассу. Крупные древесные остатки коренных лесов представлены главным образом валежом и зависшими стволами, в то время как во вторичных лесах отпад на 80 % (исключение – вторичный древостой на пробной площади 5) состоит из пней и сухостойных деревьев. Во вторичных лесах преобладают крупные древесные остатки 4–5-го классов разложения, доля 1-го класса незначительна. В коренных лесах распределение крупных древесных остатков по классам разложения зависит от частоты и интенсивности нарушений: распределение по классам разложения более выровнено, чем в нарушенном древостое. Соотношение крупных древесных остатков и древостоя в старовозрастном лесу за 20 лет сместилось от 1:2–1:3 к 1:1; баланс углерода положителен, что свидетельствует о наступлении фазы распада некоторых древостоев. На пробных площадях, где произрастает вторичный древостой, баланс положителен за счет интенсивного роста молодых деревьев, который, однако, снижается за счет низового отпада, представленного преимущественно сухостоем тонкомерных деревьев.

Полученные данные могут быть использованы для оценки устойчивости и роли в углеродном балансе коренных и нарушенных биогеоценозов, а также при разработке мероприятий по сохранению необходимого уровня биологического разнообразия в лесных экосистемах.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антанайтис В.В., Загребев В.В. Прирост леса. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 240 с. Antanaitis V.V., Zagreev V.V. *Forest Crop*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 240 p. (In Russ.).
2. Громтцев А.Н. Производные леса на западе таежной зоны России: понятия, происхождение, идентификация // Тр. КарНЦ РАН. 2019. № 5. С. 5–16.  
Gromtsev A.N. Secondary Forests in the West of the Russian Boreal Zone: Concepts, Genesis, Identification. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2019, no. 5, pp. 5–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/ecco900>
3. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.  
Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. Determination of Carbon Stocks by Volume-Conversion Coefficients Dependent on Stand Age. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1998, no. 3, pp. 84–93. (In Russ.).
4. Капица 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.).
5. Лиханова Н.В., Бобкова К.С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми // Теорет. и приклад. экология. 2019. № 2. С. 91–100.  
Likhanova N.V., Bobkova K.S. Pools and Carbon Fluxes in Felling Ecosystems Spruce Forests of the Middle Taiga of the Komi Republic. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology, 2019, no. 2, pp. 91–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-091-100>
6. Мелехов И.С. Основы типологии вырубок // Основы типологии вырубок и ее значение в лесном хозяйстве: сб. ст. / АН СССР. Ин-т леса и лесохимии; под ред. акад. ВАСХНИЛ И.С. Мелехова. Архангельск, 1959. С. 5–33.  
Melekhov I.S. Basics of Felling Typology. *Osnovy tipologii vyrubok i ee znachenie v lesnom khozjajstve*: Collection of Articles. Ed. by acad. Of VASKhNIL I.S. Melekhov. Arkhangelsk, Academy of Sciences of the Soviet Union, Institute of Forestry and Wood Chemistry, 1959, pp. 5–33. (In Russ.).
7. Мухортова Л.В., Ведрова Э.Ф. Вклад крупных древесных остатков в динамику запасов органического вещества послерубочных лесных экосистем // Лесоведение. 2012. № 6. С. 55–62.  
Mukhortova L.V., Vedrova E.F. Contribution of Coarse Woody Debris to the Dynamics of Organic Matter Stocks in Postharvest Forest Ecosystems. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2012, no. 6, pp. 55–62. (In Russ.).
8. Попова Т.А., Березкина Л.И., Бычкова И.А., Леонтьева Е.В., Семенова Н.Н., Шубина М.А. Природный парк «Вепский лес». СПб.: Вести, 2005. 344 с.  
Popova T.A., Berezkina L.I., Bychkova I.A., Leont'yeva E.V., Semenova N.N., Shubina M.A. *Nature Park "Vepssky Forest"*. St. Petersburg, Vesti Publ., 2005. 344 p. (In Russ.).
9. Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф. Экологическая роль ветровалов. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 192 с.  
Skvortsova E.B., Ulanova N.G., Basevich V.F. *The Ecological Role of Windfalls*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 192 p. (In Russ.).
10. Федорчук В.Н., Кузнецова М.Л., Андреева А.А., Моисеев Д.В. Резерват «Вепский лес». Лесоводственные исследования. СПб.: СПбНИИЛХ, 1998. 208 с.  
Fedorchuk V.N., Kuznetsova M.L., Andreeva A.A., Moiseev D.V. *"Vepssky forest" Reserve. Lesovodstvennyye issledovaniya*. St. Petersburg, Saint Petersburg Forestry Research Institute Publ., 1998. 208 p. (In Russ.).

11. Федорчук В.Н., Шорохова Е.В., Шорохов А.А., Кузнецова М.Л. Возрастная динамика еловых древостоев северо-западной части Русской равнины // Лесоведение. 2011. № 3. С. 3–13.

Fedorchuk V.N., Shorokhova E.V., Shorokhov A.A., Kuznetsova M.L. Dynamics of Spruce Forest Stands in the Northwestern Part of Russian Plain. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2011, no. 3, pp. 3–13. (In Russ.).

12. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесн. таксация и лесоустройство. 2009. Вып. 1(41). С. 133–147. Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Nilsson S. Assessment of Woody Detritus in Forests of Russia. *Lesnaya taksatsiya i lesoustrojstvo*, 2009, iss. 1(41), pp. 133–147. (In Russ.).

13. Шорохова Е.В., Шорохов А.А. Характеристика классов разложения древесного детрита ели, березы и осины в ельниках подзоны средней тайги // Тр. СПбНИИЛХ. 1999. Вып. 1. С. 17–23.

Shorokhova E.V., Shorokhov A.A. Features of the Woody Debris Decomposition Classes of Spruce, Birch and Aspen in Spruce Forests of Subdomain of Middle Taiga. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 1999, iss. 1, pp. 17–23. (In Russ.).

14. Ярошенко А.Ю. Об оставлении при сплошных рубках малоценных лиственных деревьев // Лесн. бюл. 2005. № 28. С. 27–32.

Yaroshenko A.Yu. On Abandonment of Low-Value Deciduous Trees during Continuous Logging. *Lesnoy bulletin* = Forestry Bulletin, 2005, no. 28, pp. 27–32. (In Russ.).

15. Bobiec A., Gutowski J.M., Laudenslayer W.F., Pawlaczyk P., Zub K. *The Afterlife of a Tree*. Warszawa, Hajnowka, WWF Poland, 2005. 252 p.

16. Gustaffson L., Hannerz M., Koivula M., Shorohova E., Vanha-Majamaa I., Weslien J. Research on Retention Forestry in Northern Europe. *Ecological Processes*, 2020, vol. 9, art. no. 3. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0208-2>

17. Harmon M.E. The Role of Woody Detritus in Biogeochemical Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 2021, vol. 154, pp. 349–369. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00751-x>

18. Harmon M.E., Franclin 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 K.Jr., Cummins K.W. Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, vol. 15, pp. 133–302.

19. Puletti N., Canullo R., Mattioli W., Gawryś R., Corona P., Czerepko J. A Dataset of Forest Volume Deadwood Estimates for Europe. *Annals of Forest Science*, 2019, vol. 76, art. no. 68. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0832-0>

20. Shorohova E., Kapitsa E. The Decomposition Rate of Non-Stem Components of Coarse Woody Debris (CWD) in European Boreal Forests Mainly Depends on Site Moisture and Tree Species. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 593–606. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0957-8>

21. Siitonen J. Forest Management, Coarse Woody Debris and Saproxylic Organisms: Fennoscandian Boreal Forests as an Example. *Ecological Bulletins*, 2001, no. 49, pp. 11–41.

22. Siitonen J., Martikainen P., Punttila P., Rauh J. Coarse Woody Debris and Stand Characteristics in Mature Managed and Old-Growth Boreal Mesic Forests in Southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 128, iss. 3, pp. 211–225. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00148-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00148-6)

23. Ståhl G., Ringvall A., Fridman J. Assessment of Coarse Woody Debris – a Methodological Overview. *Ecological Bulletins*, 2001, no. 49, pp. 57–70.

**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 581.55:582.47:551.5(470.13)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-107-117

## Водообмен в хвойных фитоценозах под влиянием климатических изменений

*С.Н. Сенькина, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-9802-2015](https://orcid.org/0009-0008-0871-1399),*

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0871-1399>*

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия, 167982; senkina@ib.komisc.ru*

*Поступила в редакцию 24.10.22 / Одобрена после рецензирования 26.01.23 / Принята к печати 28.01.23*

**Аннотация.** Древесная растительность и атмосфера тесно связаны между собой, что определяет актуальность изучения данного взаимодействия в рамках проблемы глобальных изменений климата и устойчивости наземных экосистем к внешним воздействиям. Для региона исследований – Республики Коми – выявлено потепление климата, выражающееся в повышенной температуре воздуха в летний период. Самым теплым за годы наблюдений был 2013 г., когда средняя температура воздуха в летний период составила 17,2 °С, в то время как среднемноголетняя норма равняется 14,6 °С. Рост и продуктивность древесных растений в лесном сообществе зависят от количества влаги в почве. В средней подзоне тайги запасы влаги составляют 60–200 мм, поэтому древесные растения не испытывают в ней недостатка. В связи с этим исследована интенсивность транспирации хвой сосны обыкновенной и ели сибирской в разных типах леса при колебаниях погодных условий. Результаты исследования показали, что при повышенной температуре воздуха и небольшом количестве осадков в условиях благоприятного почвенного водоснабжения интенсивность транспирации у сосны увеличивается в 1,5 раза, у ели – в 3 раза. Это связано, вероятно, с тем, что устьица ели особенно быстро реагируют на изменение внешних условий, что определяется повышенной чувствительностью хвой к условиям влагообеспеченности. Установлено, что в этот же период между интенсивностью транспирации и температурой воздуха существует наиболее тесная зависимость ( $r = 0,7-0,9$ ). В разных типах леса интенсивность транспирации у сосны варьирует в пределах от 4 до 16 %, у ели – в пределах 5 %. Оценка изменений интенсивности транспирации хвой у сосны и ели в ответ на меняющиеся погодные условия показала, что данный процесс во многом обусловлен видовой принадлежностью породы. Сосна является светолюбивой и имеет стержневую корневую систему. Ель – теневыносливая с поверхностной корневой системой.

**Ключевые слова:** климат, температура воздуха, влагообеспеченность, интенсивность транспирации, сосна обыкновенная, ель сибирская, Республика Коми

**Благодарности:** Работа выполнена в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН в рамках госзадания по теме НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России», № госрегистрации – 122040100031-8.

*Для цитирования:* Сенькина С.Н. Водообмен в хвойных фитоценозах под влиянием климатических изменений // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 107–117. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-107-117>

Original article

## Water Exchange in Coniferous Phytocenoses under the Influence of Climate Change

*Svetlana N. Sen'kina, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;*

*ResearcherID: P-9802-2015, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0871-1399>*

*Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; [senkina@ib.komisc.ru](mailto:senkina@ib.komisc.ru)*

*Received on October 24, 2022 / Approved after reviewing on January 26, 2023 / Accepted on January 28, 2023*

**Abstract.** Woody vegetation and the atmosphere are closely related, which determines the relevance of studying this interaction within the framework of the problem of global climate change and the resilience of terrestrial ecosystems to external influences. For the research region, the Komi Republic, climate warming has been revealed, expressed in increased air temperature in the summer. The warmest year over the years of observation was 2013, when the average air temperature in the summer was 17.2 °C, while the long-term annual average norm was 14.6 °C. The growth and productivity of woody plants in a forest community depend on the amount of moisture in the soil. In the middle subzone of the taiga, moisture reserves are 60–200 mm, so woody plants do not lack it. In this regard, transpiration rates of Scots pine and Siberian spruce needles in different types of forest under fluctuating weather conditions has been studied. The results of the research have shown that at elevated air temperatures, low amounts of precipitation and favourable soil water supply, the transpiration rate in pine increases by 1.5 times, and in spruce by 3 times. This is probably due to the fact that the spruce stomata react especially quickly to changes in external conditions, which is determined by the increased sensitivity of the needles to moisture conditions. It has been established that during the same period there is the closest relationship between the transpiration rate and the air temperature ( $r = 0.7–0.9$ ). In different types of forest, the transpiration rate in pine varies from 4 to 16 %, in spruce within 5 %. An assessment of changes in the pine and spruce needles transpiration rates in response to changing weather conditions has shown that this process is largely determined by the species membership. Pine is a light-demanding species with a taproot system. Spruce is a shade-tolerant species with a shallow root system.

**Keywords:** climate, air temperature, water availability, transpiration rate, Scots pine, Siberian spruce, the Komi Republic

**Acknowledgements:** The research was carried out at the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state assignment on the research topic “Zonal Patterns of the Dynamics of the Structure and Productivity of Primary and Anthropogenically Modified Phytocenoses of Forest and March Ecosystems of the European North-East of Russia” (state registration no. 122040100031-8).



**For citation:** Sen'kina S.N. Water Exchange in Coniferous Phytocenoses under the Influence of Climate Change. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 3, pp. 107–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-107-117>

### *Введение*

Климат в мире неуклонно меняется, хотя глобальное потепление продолжает оставаться дискуссионной темой. По данным Росгидромета, климат в Российской Федерации теплеет сильнее, чем по всей планете. Ученые считают, что к концу XXI в. среднегодовая температура воздуха превысит 1,5 °С. Некоторые модели прогнозов изменения климата в отчете Межправительственной группы ООН за 2014 г. [18] предсказывают, что рост температуры превысит 2 °С. По данным Института космических исследований им. Годдара, 2001–2016 гг. были самыми теплыми на Земле за всю историю климатических наблюдений. На большей части нашей страны прослеживается тенденция к увеличению годовых сумм осадков со скоростью 2,2 % за 10 лет. Изменяющийся климат может способствовать более частому возникновению сложных ситуаций в лесах как в периоды их роста, так и в периоды покоя. В случае потепления климата в будущем изменения водообмена древесной растительности и значений водного баланса наиболее вероятны для превосходящей части таежной зоны, что может привести к изменению в структуре, функционировании и динамике растительных сообществ, повлиять на их продуктивность и устойчивость [20].

Устойчивость лесных сообществ Севера во многом определяется условиями окружающей среды. Водообмен растений зависит от почвенно-климатических особенностей, таких как водно-физические свойства почвы, количество осадков, температура и влажность воздуха, количество поступающей солнечной радиации [5]. Влага является фактором, играющим важную роль в жизни растений, детерминирующим способность поддерживать стабильный водный баланс, который имеет ключевое значение для их жизнедеятельности [16, 21, 22].

По степени значимости и информативности одним из главных показателей водообмена растений является транспирация как важнейшее звено в цепи обменных процессов, существенно влияющих на формирование древостоев таежной зоны [1, 4]. У древесных растений интенсивность транспирации зависит от многих факторов, как внешних (погодных), так и внутренних, связанных с биохимическими и физиологическими процессами, образующими единую систему функционирования растительного организма. Транспирация – сложный физиологический процесс, имеющий свои закономерности и особенности, которые определяются видоспецифичностью разных пород деревьев. Как отмечают А.З. Швиденко и др. [17], каждая древесная порода характеризуется своим адаптивным потенциалом, он может быть определен как ее способность реагировать на изменение внешней среды. Так, у теневыносливых пород (в их число входит и ель) при повышении облачности интенсивность транспирации снижается медленнее, чем у сосны – светолюбивой породы. Ель, имея поверхностную корневую систему, способна активно использовать влагу из верхних слоев почвы, водообмен у этой породы замедлен, интенсивность транспирации почти в 2 раза ниже, чем у сосны.

Чтобы проследить, как изменяется интенсивность отдачи воды хвоей таких древесных пород, как ель сибирская и сосна обыкновенная, которые преобладают

в фитоценозах средней тайги в изучаемом регионе – Республике Коми, в зависимости от метеоусловий, были выбраны 2 показательных погодных фактора, характеризующих изменение климата региона, – температура воздуха и осадки.

Изучение водообмена важно для оценки адаптационной способности растений в меняющихся климатических условиях. Это свидетельствует об актуальности нашего исследования.

Цель – рассмотрение динамики транспирации хвой сосны и ели в зависимости от изменений метеорологических факторов.

Задачей исследования является анализ водного обмена, интенсивности транспирации хвой сосны обыкновенной и ели сибирской в разные годы.

#### *Объекты и методы исследования*

Наблюдение за водным режимом сосны обыкновенной и ели сибирской проводилось на территориях Чернамского (62° с. ш. 50°20' в. д.) и Ляльского (62° с. ш. 50°40' в. д.) лесных стационаров Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, расположенных соответственно в 40 и 80 км к северу от г. Сыктывкара в подзоне средней тайги. Чернамский лесной стационар находится на юго-востоке Усть-Вымского района, Ляльский лесоэкологический стационар – на территории Княжпогостского района Республики Коми. Таксационная характеристика древостоев представлена в табл. 1.

Измерения проводили в 3 летних месяца – июнь, июль, август, в полуденные часы – с 9 до 15 ч в 1981–1984, 1994, 1995, 2002–2004, 2008, 2010, 2012 и 2013 гг. В основу климатических характеристик положены средние многолетние данные метеостанции Усть-Вымь, расположенной на 30–40 км северозападнее Чернамского и на 10–20 км юго-западнее Ляльского стационаров. По данным метеостанции, почти 1/2 годовых осадков (332 из 693 мм) выпадает в течение мая–сентября. Их количество превышает суммарное испарение (442 мм), что создает положительный баланс влаги на землях изучаемых объектов (коэффициент увлажнения равен 1,6), среднегодовая температура воздуха в средней тайге составляет от –1,3 до +0,4 °С. Летом территория Республики получает достаточно большое количество суммарной солнечной радиации, средняя влажность воздуха равна 55–75 %.

В соответствии с программой и методикой биогеоэкологических исследований [10], в эколого-физиологическом плане наблюдениями достаточно охватить 3–5 деревьев. Измерения выбранных деревьев проводились непосредственно в их кроне на специально построенных вышках с площадками на разной высоте.

С 1981 по 2004 гг. в основу измерений интенсивности транспирации положен метод быстрого взвешивания [6]. С 2008 по 2013 гг. запись показаний интенсивности транспирации производилась на интактной хвое 2-го года жизни в средней части кроны с помощью электронного газоанализатора Li-Cor 6400 (США). Информация фиксировалась прибором автоматически через каждые 5 мин. Для того чтобы данные, полученные разными методами, были сравнимы между собой, проведен параллельный замер интенсивности транспирации обоими методами с переводом расчетного коэффициента с миллимолей на квадратный метр в секунду в миллиграммы на грамм сырой массы хвой в час.

Данные обрабатывали с помощью стандартных статистических методов [9], а также компьютерных программ Microsoft Office Excel и Statistica.

Таблица 1

Таксационная характеристика исследованных древостоев  
The taxation characteristics of the studied stands

Тип леса	Состав древостоя	Возраст, лет	Количество деревьев, шт./Га	Класс бонитета	Полнота	Средние для ствола		Тип почвы
						диаметр, см	высота, м	
<i>Чернамский стационар</i>								
Сосново-еловый черничный	8С2Б+Е (1-й ярус)	60	3070	III	0,95	16	15	Мощный иллювиально-гумусовый железистый подзол [3]
	6Е2С2Б (2-й ярус)	70		IV		18	9	
Сосняк черничный	9С1Б	60	1730	III	0,82	14	16	Мощный иллювиально-гумусовый песчаный подзол [3]
<i>Ляльский стационар</i>								
Ельник черничный	9Е1Б+С ед. Пх	100–200	625	V	0,83	20–40	16–22	Торфянисто-подзолисто-глеевая, супесчаная [8]
Сосняк сфагновый	10Сед. Б	50–60	700	III	0,70	24	16	Торфянисто-подзолисто-глеевая [2]

*Результаты исследования и их обсуждение*

По данным метеостанции Усть-Вымь, в 1981 г. температура воздуха в летние месяцы составила в среднем 16,5 °С, осадков было 84 мм, т. е. температура оказалась выше нормы на 1,9 °С, а осадков выпало на 20 % больше нормы. 1982 г. характеризовался как более прохладный с количеством осадков больше среднесноголетней нормы. В 1983 г. температура воздуха наблюдалась в пределах нормы, а осадки превышали ее. В 1984 г. температура воздуха не выходила за нормативные значения, а осадки превысили среднесноголетнюю норму на 35 %. В 1994 г. отмечены температура, близкая к норме, и пониженное количество осадков. В 1995 г. летний период был прохладным с осадками выше нормы. 2002 г. – прохладный, с небольшим количеством осадков. 2003 г. – теплый, с осадками ниже нормы на 9 %. 2004 г. – также теплый, осадков меньше нормы на 13 %. 2008 г. оказался теплым, осадков выпало на 12 % меньше нормы. В 2010 г. температура воздуха превысила среднесноголетнюю норму на 9,6 °С, а количество осадков было на 21 % меньше среднесноголетнего значения. 2012 г. – теплый, но очень дождливый: осадков зафиксировано в 2 раза больше, чем обычно. Самым теплым оказался 2013 г., когда средняя температура воздуха в летний период составила 17,2 °С при норме 14,6 °С, а осадков выпало на 43 % меньше нормы (табл. 2, 3).

Таблица 2

**Среднемесячная температура воздуха (°С)  
для региона исследования за летние месяцы в разные годы  
The average monthly air temperature (°C) for the study region  
during the summer months in different years**

Год	Июнь	Июль	Август
1981	16,3 (+2,6)	18,3 (+2,0)	15,0 (+1,3)
1982	9,8 (-3,9)	17,4 (+1,1)	12,8 (-0,9)
1983	12,4 (-1,3)	17,8 (+1,5)	12,8 (-0,9)
1984	13,8 (+0,1)	17,5 (+1,2)	11,7 (-2,0)
1994	14,3 (+0,6)	15,2 (-1,1)	12,9 (-0,8)
1995	10,0 (-3,7)	16,0 (-0,3)	14,5 (+0,8)
2002	12,7 (-1,0)	17,6 (+1,3)	9,6 (-4,1)
2003	10,8 (+2,9)	18,4 (+2,1)	17,1 (+3,4)
2004	12,5 (-1,2)	19,9 (+3,6)	13,4 (-0,3)
2008	14,3 (+0,6)	18,5 (+2,2)	13,3 (-0,4)
2010	13,3 (-0,4)	19,8 (+3,5)	14,9 (+1,2)
2012	15,1 (+1,4)	17,2 (+0,9)	13,9 (+0,2)
2013	16,7 (+3,0)	19,2 (+2,9)	15,8 (+2,1)
Среднемесячная норма*	13,7	16,3	13,7

Примечание: \*Согласно [13]. В скобках приведено отклонение от среднесноголетней нормы.



Таблица 3

**Количество осадков (мм) для региона исследования  
за летние месяцы в разные годы**  
**The precipitation amount (mm) for the study region during the summer months  
in different years**

Год	Июнь	Июль	Август	Сумма осадков
1981	83 (119)	57 (80)	111 (161)	251
1982	101 (144)	81 (114)	38 (55)	220
1983	72 (103)	102 (144)	54 (78)	228
1984	54 (77)	172 (242)	54 (78)	280
1994	131 (187)	19 (27)	22 (32)	172
1995	42 (60)	79 (111)	101 (146)	222
2002	43 (61)	16 (23)	71 (103)	130
2003	101 (144)	34 (48)	54 (78)	189
2004	71 (101)	21 (30)	89 (129)	181
2008	45 (64)	42 (59)	144 (209)	231
2010	111 (159)	12 (17)	41 (59)	264
2012	155 (221)	165 (232)	75 (109)	395
2013	36 (72)	33 (46)	48 (70)	117
Среднемесячная норма*	70	71	69	207

Примечание: \*Согласно [14]. В скобках обозначена доля (%) от среднегодовой нормы.

По данным табл. 2, в большинстве случаев средняя температура летних месяцев превышает норму, особенно в июле. В средней подзоне тайги наблюдается достаточная обеспеченность почв влагой, ее запасы в верхнем слое составляют 60–200 мм, поэтому древесные растения не испытывают в ней недостатка [3]. В летние месяцы в разные годы средняя сумма осадков составила в июне 80 мм, в июле – 64 мм, в августе – 69 мм, т. е. осадков в июне было на 14 % больше среднегодовой нормы, в июле – на 10 % меньше, в августе их количество было в пределах среднегодовой нормы.

В разных типах леса интенсивность транспирации у сосны составляет от 4 до 16 %, у ели она лежит в пределах 5 % (табл. 4). Ранее было установлено, что хвоя сосны использует на этот процесс в час до 33 % содержащейся в ней влаги, в то время как ель – только 16 % [11].

Для оценки влияния температуры воздуха на интенсивность транспирации был проведен анализ корреляционных связей. Для этого отобраны годы, когда преобладала погода с температурой выше среднегодовой нормы, но с повышенным количеством осадков – тепло, дождливо; прохладная, но с дождями – холодно, дождливо; а также погода с сочетаниями «тепло, сухо»; «холодно, сухо» (табл. 5). Корреляционные зависимости между интенсивностью транспирации и температурой воздуха в разные по погодным условиям годы показали, что связь является тесной в теплые и сухие годы. При других сочетаниях погодных факторов значения корреляции между этими показателями варьируют от 0,2 до 0,5. В литературе встречается и противоположное мнение, что лесным растениям присуще усиление транспирации во влажные и холодные годы [7, 12].

Таблица 4

**Интенсивность транспирации сосны и ели в регионе исследования  
в разные по погодным условиям годы  
The transpiration rates of pine and spruce in the study region  
in years with different weather conditions**

Тип леса	Год	Интенсивность транспирации, мг/(г·ч)
<i>Сосна</i>		
Сосново-еловый черничный	1981	242,0±25,7
	1982	168,0±17,0
	1983	193,6±11,7
	1984	193,6±13,3
Сосняк черничный	1982	163,0±14,4
	1983	187,1±9,4
	1984	153,5±11,2
Сосняк сфагновый	2010	192,2±23,1
<i>Среднее</i>		186,6±15,7
<i>Ель</i>		
Сосново-еловый черничный	1981	98,4±8,2
	1982	124,1±14,9
	1983	86,7±5,1
	1984	83,3±9,0
Ельник черничный	1994	76,0±6,3
	1995	74,1±8,8
	2002	92,3±5,2
	2003	87,6±5,2
	2004	135,4±21,0
	2008	174,5±19,5
	2012	52,6±6,0
2013	137,1±22,8	
<i>Среднее</i>		101,8±11,0

При высокой температуре воздуха интенсивность транспирации древесных растений возрастает, что связано с нарушением водного баланса, которое, в свою очередь, приводит к изменениям некоторых физиологических процессов. Вследствие недостатка влаги происходит сбой нормального обмена веществ, из-за этого у растений может высыхать и осыпаться хвоя. По нашим данным, повышение температуры воздуха в теплые и сухие годы от 16 до 29 °С увеличивает интенсивность транспирации сосны со 182,2 до 304,1 мг/(г·ч), т. е. более чем в 1,5 раза.

Таблица 5

**Корреляционные коэффициенты интенсивности транспирации  
с температурой воздуха для региона исследования**  
**The correlation coefficients of transpiration rates with air temperatures  
for the study region**

Сочетание температуры и осадков	Годы	Коэффициент корреляции ± ошибка	
		Сосна	Ель
Тепло, дождливо	1981, 1994, 2003, 2012	0,4±0,2	0,2±0,05
Холодно, дождливо	1982	0,4±0,1	0,4±0,2
Тепло, сухо	1983, 2002, 2004, 2008, 2010, 2013	0,7±0,1	0,9±0,1
Холодно, сухо	1984, 1995	0,5±0,2	0,4±0,1

У ели в этих же условиях при повышении температуры от 14 до 28 °С интенсивность транспирации меняется с 88,6 до 298 мг/(г·ч), т. е. растет примерно в 3 раза. Известно, что устьица у данного вида особенно быстро реагируют на изменения внешних условий, что определяется повышенной чувствительностью хвои к условиям влагообеспеченности [15, 19].

*Выводы*

1. Установлено, что тесная положительная зависимость между интенсивностью транспирации хвои сосны и ели и температурой воздуха проявляется в годы с повышенной температурой и малым количеством осадков. При других сочетаниях погодных условий корреляционная зависимость между этими показателями слабая.

2. При повышенной температуре воздуха и малом количестве осадков интенсивность транспирации сосны увеличивается более чем в 1,5 раза.

3. У ели интенсивность транспирации растет примерно в 3 раза. Это связано, вероятно, с особенно быстрой реакцией устьиц ели на изменение внешних условий из-за повышенной чувствительности хвои к условиям влагообеспеченности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абрашко В.И.* Водный режим сообществ еловых лесов: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1998. 46 с.

*Abrazhko V.I.* *Water Regime in Spruce Forest Communities: Doc. Biol. Sci. Diss. Abs.* St. Petersburg, 1998. 46 p. (In Russ.).

2. Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2001. 278 с.

*Bioproduction Process in Forest Ecosystems of the North.* Eds.-in-chief K.S. Bobkova, E.P. Galenko. St. Petersburg, Nauka Publ., 2001. 278 p. (In Russ.).

3. *Бобкова К.С.* Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. 156 с.

*Bobkova K.S.* *Biological Productivity of Coniferous Forests of the European North-East.* Leningrad, Nauka Publ., 1987. 156 p. (In Russ.).

4. Веретенников А.В. Физиология растений. 2-е изд., перераб. Воронеж: ВГЛТА, 2002. 272 с.

Veretennikov A.V. *Plant Physiology*: 2nd ed., revised. Voronezh, Voronezh State Forest Engineering Academy Publ., 2002. 272 p. (In Russ.).

5. Водный режим растений в связи с разными экологическими условиями / отв. ред. Н.С. Петин. Казань: Казан. ун-т, 1978. 392 с.

*Water Regime of Plants in Connection with Different Environmental Conditions*. Ed.-in-chief N.S. Petinov. Kazan, Kazan University Publ., 1978. 392 p. (In Russ.).

6. Иванов Л.А., Силина А.А., Цельникер Ю.Л. О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях // Ботан. журн. 1950. Т. 35, № 2. С. 171–185.

Ivanov L.A., Silina A.A., Tselniker Yu.L. On the Rapid Weighing Method for Determining Transpiration in Natural Conditions. *Botanichesky zhurnal*, 1950, vol. 35, no. 2, pp. 171–185. (In Russ.).

7. Козлова Л.Н. Расход воды на транспирацию лесными фитоценозами Красноярско-Ачинской лесостепи // Средообразующая роль лесных экосистем Сибири: сб. ст. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т леса и древесины им. В.Н. Сукачева; отв. ред. В.В. Протопопов. Красноярск, 1982. С. 46–58.

Kozlova L.N. Water Consumption for Transpiration by Forest Phytocenoses of the Krasnoyarsk-Achinsk Forest-Steppe. *The Environment-Forming Role of Forest Ecosystems in Siberia: Collected Works*. USSR Academy of Sciences, Sib. Department, Institute of Forest and Wood named after V.N. Sukachev. Ed.-in-chief V.V. Protopopov. Krasnoyarsk, 1982, pp. 46–58. (In Russ.).

8. Коренные еловые леса Севера: Биоразнообразие, структура, функции / отв. ред. К.С. Бобкова, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 338 с.

*Indigenous Spruce Forests of the North: Biodiversity, Structure, Functions*. Eds.-in-chief K.S. Bobkova, E.P. Galenko. St. Petersburg, Nauka Publ., 2006. 338 p. (In Russ.).

9. Лакин Г.Ф. Биометрия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1980. 293 с.

Lakin G.F. *Biometrics*: 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 293 p. (In Russ.).

10. Программа и методика биогеоценологических исследований / под ред. акад. В.Н. Сукачёва и д-ра биол. наук Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1966. 334 с.

*Program and Methodology of Biogeocenological Research*. Ed. by acad. V.N. Sukachev and doc. of biol. N.V. Dylis. Moscow, Nauka Publ., 1966. 334 p. (In Russ.).

11. Сенькина С.Н. Водный режим сосны и ели в фитоценозах Севера. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 104 с.

Sen'kina S.N. *Water Regime of Pine and Spruce in Phytocenoses of the North*. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS, 2013. 104 p. (In Russ.).

12. Силина А.А. О транспирации древесных пород Теллермановского лесничества // Физиология растений. 1955. Т. 2, № 4. С. 364–372.

Silina A.A. On the Transpiration of Tree Species of the Tellerman Forestry. *Fiziologiya rasteniy*, 1955, vol. 2, no. 4, pp. 364–372. (In Russ.).

13. Справочник по климату СССР. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 380 с.

*The USSR Climate Guide. Iss. 1: the Arkhangelsk and Vologda Regions, the Karelian and Komi ASSRs. Part 2: Air and Soil Temperatures*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 380 p. (In Russ.).

14. Справочник по климату СССР. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области и Коми АССР. Ч. 4. Влажность воздуха, осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 342 с.

*The USSR Climate Guide. Iss. 1: the Arkhangelsk and Vologda Regions, the Karelian and Komi ASSRs. Part 4: Air Humidity, Precipitation, Snow Cover.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968. 342 p. (In Russ.).

15. Факторы регуляции экосистем еловых лесов / под ред. В.Г. Карпова. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1983. 318 с.

*The Factors Regulating Spruce Forest Ecosystems.* Ed. by V.G. Karpov. Leningrad, Nauka Publ. (Leningrad Department), 1983. 318 p. (In Russ.).

16. Феклистов П.А., Гош Е.Ф. Динамика транспирации сосны и ее зависимость от внешних факторов // Проблемы экологии на Европейском Севере: сб. науч. тр. Архангельск, 1992. С. 52–54.

Feklistov P.A., Gosh E.F. Dynamics of Pine Transpiration and its Dependence on External Factors. *Environmental Problems in the European North: Collection of Scientific Papers.* Arkhangelsk, 1992, pp. 52–54. (In Russ.).

17. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Кракхнер Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 3–25.

Shvidenko A.Z., Schepachenko D.G., Krahner F., Onuchin A.A. Transition to Sustainable Forest Management in Russia: Theoretical and Methodological Background. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 3–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170601>

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

19. Jones H.G. Stomatal Control of Photosynthesis and Transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 1998, vol. 49, special issue, pp. 387–398. [https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special\\_Issue.387](https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special_Issue.387)

20. Varlagin A.V., Vygodskaya N.N., Kurbatova J.A. Influence of Extreme Soil Humidity Events on Transpiration, Evaporation and Carbon Balance of Boreal Forest in European Russia. *Climate Changes and Their Impact on Boreal and Temperate Forests (Ekaterinburg, June 5–7 2006): Abstracts.* Ekaterinburg, 2006, pp. 102–103.

21. Walter H. *Die Vegetation der Erde in Öko-Physiologischer Betrachtung. Band 1: Die Tropischen und Subtropischen Zonen* = Vegetation of the Earth from an Eco-Physiological Perspective. Part 1: The Tropical and Subtropical Zones. Jena, Gustav Fischer Verlag, 1964. 592 p. (In Germ.).

22. Walter H. *Die Vegetation der Erde in Öko-Physiologischer Betrachtung. Band 2: Die Gemäßigten und Arktischen Zonen* = Vegetation of the Earth from an Eco-Physiological Perspective. Part 2: The Temperate and Arctic Zones. Jena, Gustav Fischer Verlag, 1968. 1001 p. (In Germ.).

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья  
УДК 630\*581.192  
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-118-129

### Особенности накопления минеральных элементов и азота в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной

**П.А. Феклистов**<sup>1✉</sup>, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-2377-2020*,  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>*  
**О.Н. Тюкавина**<sup>2</sup>, *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: H-2336-2019*,  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>*  
**Н.Р. Сунгурова**<sup>2</sup>, *д-р с.-х. наук, доц.*;  
*ResearcherID: H-1847-2019*, *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>*  
**С.С. Макаров**<sup>3</sup>, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: AAK-9829-2021*,  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>*  
**И.Н. Болотов**<sup>1</sup>, *д-р биол. наук, директор*; *ResearcherID: P-2892-2015*,  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>*  
**С.Н. Тарханов**<sup>1</sup>, *д-р биол. наук, ст. науч. сотр.*; *ResearcherID: ABG-7237-2020*,  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; pfeklistov@yandex.ru<sup>✉</sup>, dirnauka@fciarctic.ru, tarkse@yandex.ru


<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru, n.sungurova@narfu.ru

<sup>3</sup>Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; s.makarov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 15.03.22 / Одобрена после рецензирования 09.06.22 / Принята к печати 13.06.22

**Аннотация.** Исследование проводили в Архангельском лесничестве Архангельской области в осушенном кустарничково-сфагновом сосняке. Были подобраны средние по диаметру и высоте для древостоя учетные деревья, у которых на модельных ветвях отбирались образцы хвои, как живой, так и отмирающей желтой, побегов разного возраста. Также взяты образцы почвы из 3 верхних горизонтов. Установлено, что больше всего азота и минеральных элементов накапливается в живой хвое – в среднем 4,4 %, в отмирающей хвое и побегах их на 37–40 % меньше. Среди всех элементов большую долю составляют азот, калий и кальций, остальных химических элементов в разы меньше. По убыванию доли они располагаются в следующем порядке: магний, сера, фосфор, марганец, кремний, железо и алюминий. Из отмирающей желтой хвои в значительных количествах выводятся наиболее важные минеральные элементы. Содержание серы, магния, фосфора, марганца и железа сокращается в ней соответственно в 3,3; 2,1; 8,0; 1,5 и 1,4 раза по сравнению с живой хвоей. Получены данные по наличию азота и минеральных элементов в почвенных горизонтах  $A_0$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . Установлено, что некоторые важнейшие для жизни дерева элементы сосредоточены в живой хвое в значительно больших количествах, чем в почве: калия, фосфора, марганца и кальция – соответственно в 12,0; 4,0; 6,0 и 1,9 раза. Желтая (опадающая) хвоя создает биологический круговорот веществ. Количество азота и зольных элементов в этой хвое пропорционально их наличию в почве.

© Феклистов П.А., Тюкавина О.Н., Сунгурова Н.Р., Макаров С.С., Болотов И.Н., Тарханов С.Н., 2024

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

В свою очередь, содержание минеральных элементов в побегах близко к их количеству в желтой (оппадающей) хвое, с одной стороны, а с другой, зависит от возраста побегов. Существует устойчивый тренд снижения с возрастом побегов содержания в них азота, калия, фосфора и серы.

**Ключевые слова:** сосна, минеральные элементы, азот, накопление минеральных элементов, хвоя, побеги

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёва УрО РАН, № госрегистрации – 122011400384-2. В рамках исследования применялось оборудование ЦКП НО «Арктика» (САФУ).

**Для цитирования:** Феклистов П.А., Тюкавина О.Н., Сунгурова Н.Р., Макаров С.С., Болотов И.Н., Тарханов С.Н. Особенности накопления минеральных элементов и азота в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 118–129. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-118-129>

Original article

### Peculiarities of the Accumulation of Mineral Elements and Nitrogen in the Assimilation Apparatus of Scots Pine

**Pavel A. Feklistov**<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

**Olga N. Tyukavina**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

**Nataliya R. Sungurova**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>

**Sergey S. Makarov**<sup>3</sup>, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

**Ivan N. Bolotov**<sup>1</sup>, Doctor of Biology, Director; ResearcherID: [P-2892-2015](https://orcid.org/0000-0002-3878-4192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3878-4192>

**Sergey N. Tarkhanov**<sup>1</sup>, Doctor of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: [ABG-7237-2020](https://orcid.org/0000-0001-9037-8995), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-8995>

<sup>1</sup>Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; [pfeklistov@yandex.ru](mailto:pfeklistov@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [dimnauka@fciarctic.ru](mailto:dimnauka@fciarctic.ru), [tarkse@yandex.ru](mailto:tarkse@yandex.ru)

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [o.tukavina@narfu.ru](mailto:o.tukavina@narfu.ru), [n.sungurova@narfu.ru](mailto:n.sungurova@narfu.ru)

<sup>3</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; [s.makarov@rgau-msha.ru](mailto:s.makarov@rgau-msha.ru)

Received on March 15, 2022 / Approved after reviewing on June 9, 2022 / Accepted on June 13, 2022

**Abstract.** The research has been carried out in the Arkhangelsk forestry of the Arkhangelsk Region in a drained shrub-sphagnum pine forest. Census trees of medium diameter and height for the stand have been selected, from which samples of needles, both living and dying yellow

ones, and shoots of different ages have been taken on model branches. Soil samples have also been taken from the 3 upper horizons. It has been established that most of all nitrogen and mineral elements accumulate in the living needles – 4.4 % on average, in the dying needles and shoots there are 37–40 % less. Among all the elements, nitrogen, potassium and calcium make up the largest proportion; while the rest of the chemical elements are several times less. In descending order of the share, they are arranged in the following sequence: magnesium, sulfur, phosphorus, manganese, silicon, iron and aluminum. The most important mineral elements are derived in significant quantities from the dying yellow needles. The content of sulfur, magnesium, phosphorus, manganese and iron decreases in them by 3.3, 2.1, 8.0, 1.5 and 1.4 times, respectively, compared to the living needles. Data on the presence of nitrogen and mineral elements in the soil horizons A<sub>0</sub>, T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> have been obtained. It has been established that some of the essential elements for the life of a tree are concentrated in the living needles in much larger quantities than in the soil: potassium, phosphorus, manganese and calcium – by 12.0, 4.0, 6.0 and 1.9, respectively. The yellow falling needles create a biological cycle of substances. The amount of nitrogen and ash constituents in these needles is proportional to their presence in the soil. In turn, the content of mineral elements in the shoots is close to their amount in the yellow falling needles, on the one hand, and on the other, depends on the age of the shoots. There is a steady trend of decreasing the content of nitrogen, potassium, phosphorus and sulfur with the age of the shoots.

**Keywords:** pine, mineral elements, nitrogen, accumulation of mineral elements, needles, shoots

**Acknowledgements:** The research was carried out within the framework of the state assignment of Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, state registration no. 122011400384-2. The equipment of the Center for Collective Use of Scientific Equipment “Arktika” (NArFU) was used in the research.

**For citation:** Feklistov P.A., Tyukavina O.N., Sungurova N.R., Makarov S.S., Bolotov I.N., Tarkhanov S.N. Peculiarities of the Accumulation of Mineral Elements and Nitrogen in the Assimilation Apparatus of Scots Pine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 118–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-118-129>

### Введение

Наиболее важным для жизнедеятельности растений является ассимиляционный аппарат. Именно здесь образуются первые и многие последующие органические вещества [4, 7–9]. Для процессов фотосинтеза и дыхания, а также для образования хлорофилла, белков нужны минеральные элементы и азот. Большое значение минеральные элементы имеют для формирования микро- и макрооблачков, при образовании шишек и семян [1, 5]. Репродуктивная активность растений во многом определяется наличием минеральных элементов [14, 16, 17, 20]. Накопление, перераспределение и отток азота и минеральных элементов в разных структурах ассимиляционного аппарата значимы для существования сосны. В то же время данный вопрос остается рассмотренным недостаточно с точки зрения и разных регионов [15, 18, 19, 21, 22], и условий местопроизрастания или типов леса [2, 3, 6, 10–13].

Цель исследования – изучение накопления минеральных элементов и азота у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в живой, желтой (оппадающей) хвое и побегах в сравнении с их содержанием в почве.



*Объекты и методы исследования*

Объектом исследования был осушенный кустарничково-сфагновый сосняк. Осушение проведено в 1966 г. системой каналов глубиной около 1 м с расстоянием между ними около 60 м. Древетой чистый по составу, 3-го класса возраста, V класса бонитета (табл. 1). Почва – верховая торфяная осушенная на средних торфах на тяжелом глеевом суглинке.

Таблица 1

**Таксационная характеристика исследованного древостоя**  
**The taxation characteristics of the studied stand**

ПП	Состав	Средние		Класс		Относительная полнота	Густота, шт./га	Запас, м <sup>3</sup> /га
		<i>D</i> , см	<i>H</i> , м	возраста	бонитета			
1	10С+Б	6,8	6,2	3	V	1,4	6575	105,5
4	10С+Б	6,3	7,1			0,8	3750	110,0

Примечание: ПП – пробная площадь; *D* – диаметр; *H* – высота.

Для изучения ассимиляционного аппарата были подобраны 10 средних по диаметру и высоте (табл. 1) учетных деревьев сосны обыкновенной, у которых в июле 2015 г. на средней ветви обрывалась хвоя и отделялись побеги (хвоя удалена). Образцы желтой хвои отбирали в сентябре этого же года, когда массово появилась желтая хвоя последних лет жизни. Для этого использовали 20 учетных деревьев. Увеличение количества учетных деревьев во втором случае связано с тем, что была неясна вариабельность содержания в желтой хвое минеральных элементов. Обзор научной литературы также не дал точных сведений на этот счет. Кроме того, отбирали образцы почвы массой не менее 20 г из 3 горизонтов –  $A_0$ ,  $T_1$  и  $T_2$ .

Для подготовки к химическому анализу каждый пакетик с хвоей и побегами помещали в сушильный шкаф на 24 ч при температуре 105 °С. Всего для исследования использовали 1100 образцов хвои и 150 побегов.

Рентгенофлуоресцентный анализ образцов проводили на волнодисперсионном спектрометре LabCenterXRF-1800. Предварительно высушенные пробы хвои измельчали с помощью шаровой мельницы до фракции <70 мкм и прессовали в таблетки диаметром 2,5 см. Сначала записывали спектр образца и определяли, какие элементы присутствуют в пробе. Затем методом фундаментальных параметров оценивали содержание каждого из обнаруженных элементов. Условия проведения измерения: рентгеновская трубка с родиевым анодом, напряжение – 40 кВ, сила тока – 95 мА, экспозиция – 40 и 20 с для фоновых точек. Анализ проводили в атмосфере вакуума. Использовали следующие кристаллы-анализаторы: для определения Fe, Mn, Ca, K, S, P, Mg, Na. В целях регистрирования излучения применяли сцинтилляционный и пропорциональный детекторы.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Наибольшее суммарное содержание минеральных элементов и азота наблюдается в живой хвое – 4,36 % от сухой массы (рис. 1). В литературе по этому поводу существуют разные мнения [3, 4, 6]. Например,

у А.В. Веретенникова [4] приводятся данные по сосне – 2,57 % и по ели в ельнике черничном (только для азота, фосфора, калия и кальция) – 2,64 %. Ближе данные по сосне для Карелии – до 2,7 % [6].

Сравнение количества накопленных элементов в зеленой, желтой хвое и побегах показывает заметную разницу. В живой хвое минеральных элементов и азота примерно в 1,5 раза больше, чем в желтой хвое и побегах. В то же время накопление их в желтой хвое и побегах близко: различия минимальны и составляют 0,07 %, незначимы (рис. 1).

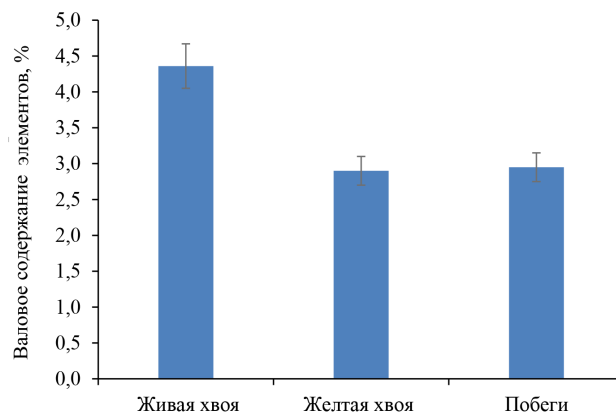


Рис. 1. Содержание химических элементов в хвое разного физиологического состояния и побегах сосны обыкновенной

Fig. 1. The content of chemical elements in the needles of different physiological conditions and in the shoots of Scots pine

По-видимому, перед отмиранием хвои заметная часть минеральных элементов и азота, содержащихся в ней, перераспределяется в живую хвою и, возможно, в побеги, а 66 % минеральных элементов и азота от содержания в живой хвое возвращается в почву с опадом.

При рассмотрении накопления каждого химического элемента видно, что они распадаются на 2 группы (рис. 2): 1-я группа – преобладающие по доле азот, кальций и калий; 2-я – остальные элементы. В живой хвое больше кальция, меньше азота и еще меньше калия. В желтой хвое и побегах превалирует азот.

Из рис. 2 следует, что элементов 2-й группы больше в живой хвое, а в желтой отмирающей и побегах их заметно меньше, за исключением натрия. Особенно крупные отличия характерны для калия, серы, магния и фосфора. Их больше в живой хвое соответственно в 5,5; 2,9; 2,1; 8,0 раза; как видим, особенно это касается фосфора и калия.

В побегах почти всех элементов меньше, чем в отмирающей хвое. Это относится к калию, кальцию, сере, магнию, железу, марганцу и натрию. Кремния содержится почти одинаково и в побегах, и в желтой хвое, количество алюминия равно в живой, желтой хвое и побегах. Исключением являются азот и фосфор – их больше в побегах. Можно предположить, что эти 2 элемента выводятся из отмирающей хвои в побеги для последующего использования. Физиологическая роль этих элементов в жизни деревьев: фотосинтез, дыхание, образование хлорофилла и структур клеток (например, фосфолипиды участвуют в образовании мембран) – очень важна.

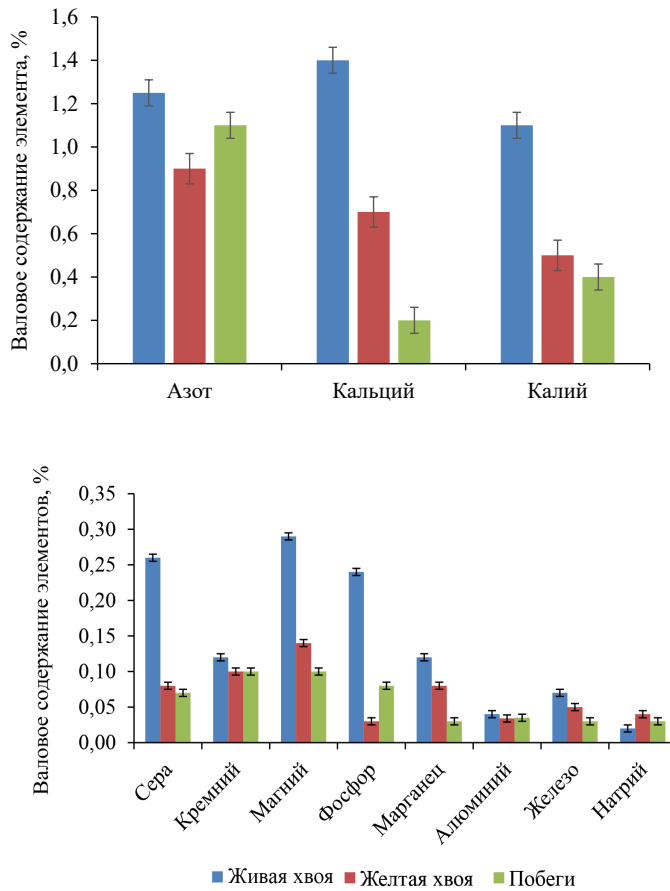


Рис. 2. Накопление химических элементов в разных частях ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной

Fig. 2. The accumulation of chemical elements in different parts of the assimilation apparatus

Желтая хвоя, однако, сохраняет определенный запас всех химических элементов и при падении обогащает почву всем спектром макро- и микроэлементов, необходимых для жизнедеятельности деревьев и для ассимиляционного аппарата.

Источником минеральных элементов для деревьев является почва, в связи с этим важно знать, какое их количество содержится в разных почвенных горизонтах на исследованном участке. Здесь также можно констатировать существенные различия в содержании минеральных элементов и азота (рис. 3) и условно выделить 2 группы элементов по их содержанию. Больше всего в разных горизонтах азота, кремния и кальция. Если азот играет в физиологии сосны чрезвычайно важную роль, то кремний, скорее, крайне низкую. Содержание азота составляет 2,0–2,1 % в разных горизонтах. Количество кремния существенно уменьшается с глубиной почвы. Кальция, наоборот, по мере углубления в почву становится больше. Этот тренд весьма отчетливый. Если в горизонте  $A_0$  содержится 0,45 % кальция, то в горизонте  $T_2$  – 0,72 %, т. е. в 1,6 раза больше.

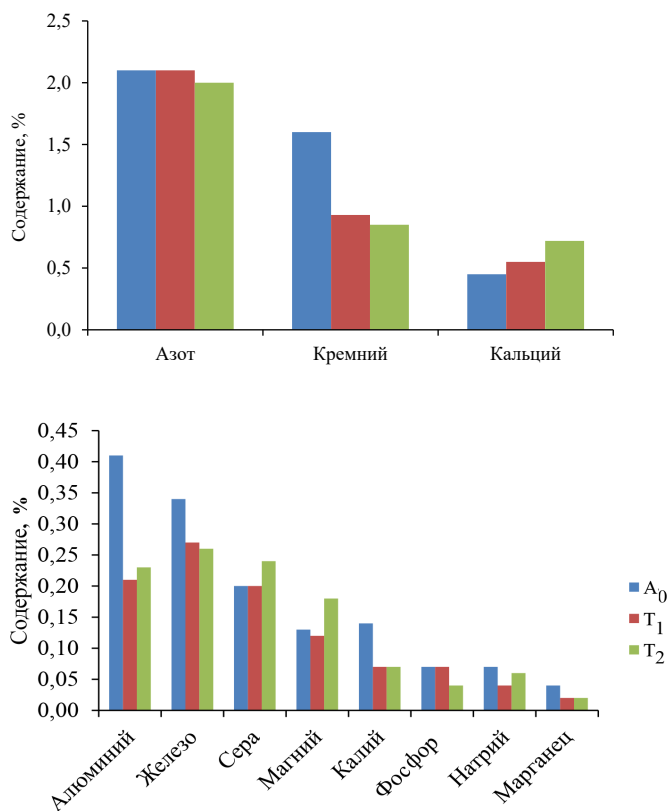


Рис. 3. Запасы химических элементов в почве

Fig. 3. The reserves of chemical elements in the soil

Из 2-й группы элементов снижение содержания по мере углубления в почву отчетливо прослеживается у алюминия, железа, фосфора, калия и марганца. Уменьшение от горизонта A<sub>0</sub> к T<sub>2</sub> происходит соответственно в 1,9; 1,3; 2,0; 1,7; 2,0 раза. Количество серы и магния наибольшее в самых глубоких почвенных горизонтах. Стабильно низким и примерно равным на разных глубинах содержанием характеризуется натрий.

Наряду с рассмотрением содержания элементов питания по профилю почвы является важной оценка соотношения их количества в почве и растении. Количество азота, значимого для обеспечения жизнедеятельности, почти в 1,7 раза меньше в ассимиляционном аппарате сосны по сравнению с содержанием в почве, т. е. для получения этого элемента есть резервы и он не лимитирует существование сосны (табл. 2). Однако обращает на себя внимание тот факт, что содержание кальция, калия, серы, магния, фосфора и марганца в живой хвое в разы больше, чем в почве. Например, калия больше в 12, фосфора – в 4, марганца – в 6 раз. Интересно, что соотношение элементов в почве и желтой хвое иное. Сера, магния и фосфора в ней меньше, чем в живой хвое и почве, но зато чуть больше алюминия по сравнению с почвой. В побегах наблюдаем еще один вариант соотношения. Здесь больше только фосфора, марганца и железа. Таким образом, видно, что для ассимиляционного аппарата в целом накопление минеральных элементов выше, чем для почвы и особенно много их запасает живая хвоя.

Таблица 2

**Содержание (%) химических элементов в почве  
и в ассимиляционном аппарате сосны обыкновенной**  
**The content (%) of chemical elements in the soil  
and in the assimilation apparatus of Scots pine**

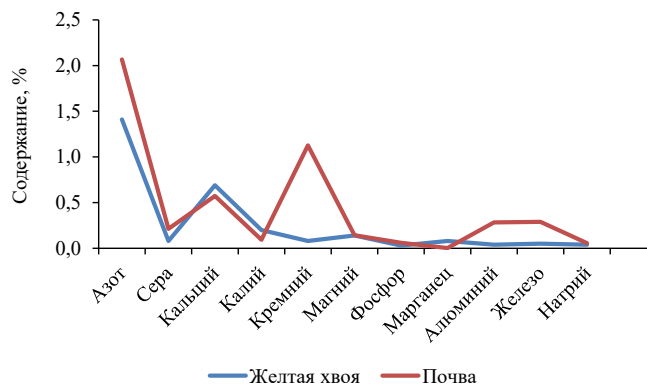
Химический элемент	Почва	Хвоя		Побеги
		живая	желтая	
Азот	2,07	1,25	1,40	1,10
Кальций	0,57	<b>0,90</b>	<b>0,70</b>	0,50
Калий	0,09	<b>1,10</b>	<b>0,20</b>	0,40
Сера	0,21	<b>0,26</b>	0,08	0,07
Кремний	1,13	0,12	0,10	0,10
Магний	0,14	<b>0,29</b>	0,14	0,10
Фосфор	0,06	<b>0,24</b>	0,03	<b>0,08</b>
Марганец	0,02	<b>0,12</b>	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>
Алюминий	0,28	0,04	<b>0,03</b>	0,04
Железо	0,29	0,07	0,05	<b>0,03</b>
Натрий	0,06	0,02	0,04	0,03

Примечание: Полу жирным шрифтом выделены значения, превышающие содержание элементов в почве.

Содержание минеральных элементов и азота в почве и их наличие в хвойном опаде тесно связаны между собой. Отчетливо проявляется круговорот элементов почвенного питания сосны (рис. 4).

Рис. 4. Содержание химических элементов в желтой (опадающей) хвое сосны обыкновенной и почве (среднее по всем горизонтам)

Fig. 4. The content of chemical elements in the yellow (falling) needles of Scots pine and in the soil (average for all horizons)



Содержание элементов в желтой хвое и почве одинаково, за исключением алюминия и железа – их в почве больше. Совершенно не совпадает с содержанием остальных элементов содержание кремния: его количество в почве значительно выше.

Важно, что на накопление минеральных элементов и азота оказывает влияние возраст побегов. Чем старше побег, тем меньше в нем содержится минеральных элементов и азота. Это справедливо для всех изученных элементов, кроме магния, что подтверждает дисперсионный анализ (табл. 3). Все расчетные критерии Фишера больше табличного для уровня значимости 0,05.

Таблица 3

Влияние возраста побегов сосны обыкновенной на накопление минеральных элементов и азота (результаты дисперсионного анализа)  
The influence of the age of the shoots of Scots pine on the accumulation of mineral elements and nitrogen (the results of dispersion analysis)

Химический элемент	Расчетный критерий Фишера	Уровень значимости	Влияние возраста побегов
Азот	7,30	0,0005	Есть
Калий	29,39	0,00002	Есть
Фосфор	9,60	0,002	Есть
Магний	0,60	0,671	Нет
Сера	12,00	0,0008	Есть
Кальций	0,61	0,663	Нет

Примечание: Критическое значение критерия Фишера для приведенных уровней значимости – 3,48.

Наиболее резкое падение содержания характерно для калия, серы и фосфора (рис. 5). С возрастом побегов количество минеральных элементов, содержащихся в них, уменьшается в 1,6–1,8 раза.

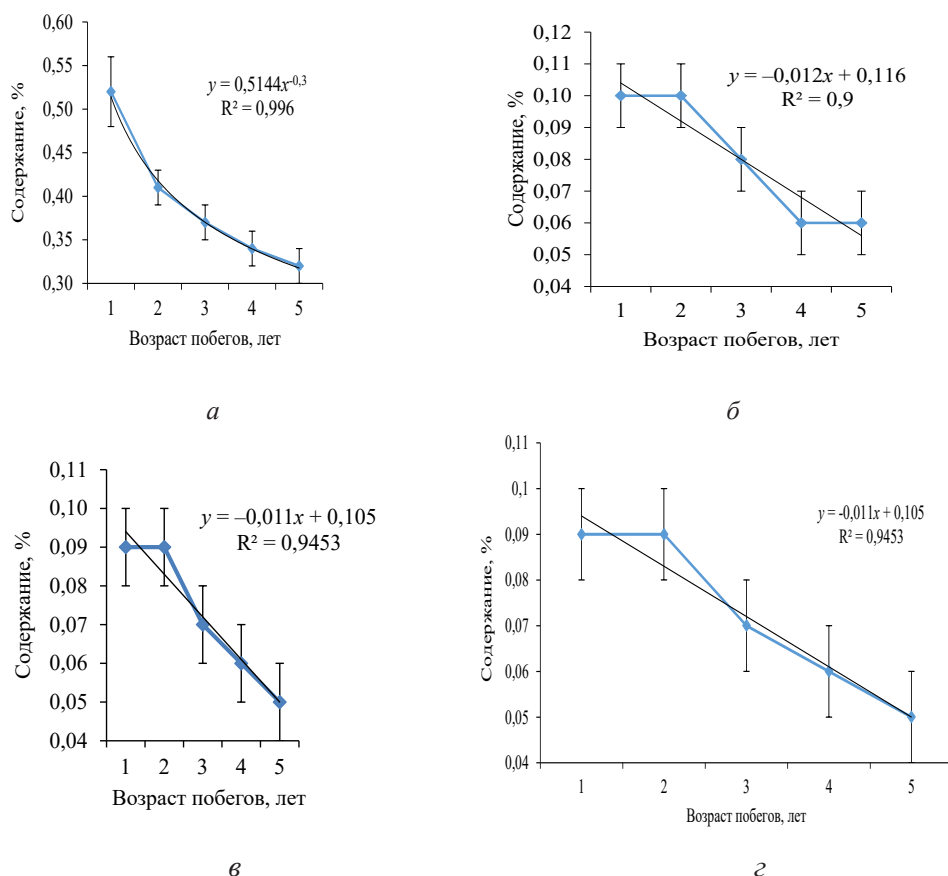


Рис. 5. Содержание макроэлементов в побегах сосны обыкновенной разного возраста: а – калий; б – сера; в – азот; г – фосфор

Fig. 5. The content of macroelements in the shoots of Scots pine of different ages: а – potassium; б – sulfur; в – nitrogen; г – phosphorus

Следует, однако, заметить, что в возрасте 4–5 лет ошибки средних значений накладываются (перекрываются), поэтому нельзя говорить с уверенностью про существенные различия для этих возрастов. Тем не менее существующий тренд имеет место и, однозначно, 1–2-летние побеги отличаются от 4–5-летних по накоплению минеральных элементов. То же самое можно сказать про азот, хотя тренд не так хорошо выражен, как для названных выше элементов. Снижение содержания минеральных элементов с возрастом побегов, по-видимому, связано с их направлением в более молодые побеги, где идут новообразования клеток и тканей, а такие элементы, как фосфор, калий, азот и сера, крайне необходимы для важнейших физиологических процессов.

### Выводы

1. В живой хвое сосны в осушенном кустарничково-сфагновом сосняке общее содержание минеральных элементов и азота составляет 4,36 %. В побегах и отмирающей хвое их на 37–40 % меньше.

2. Больше всего в ассимиляционном аппарате сосны азота, калия и кальция. Заметно меньше магния, серы, фосфора, марганца, кремния, железа и алюминия (перечислены по убыванию). В отмирающей желтой хвое существенно ниже количество минеральных элементов и азота, чем в живой хвое, а в побегах еще ниже, чем в желтой хвое, за немногим исключением.

3. В отмирающей хвое сосны уменьшается содержание серы, магния, фосфора, марганца и железа соответственно в 3,3; 2,1; 8,0; 1,5 и 1,4 раза.

4. В исследованной почве больше всего азота, кремния и кальция – 0,45–2,10 %. Других элементов – от 0,01 до 0,41 %. По убыванию их можно расположить в следующем порядке: алюминий, железо, сера, магний, калий, фосфор, натрий и марганец. На их содержание оказывает влияние глубина горизонта.

5. В живой хвое сосны калия в 12,0; фосфора – в 4,0; марганца – в 6,0; кальция – в 1,9 раза больше, чем в почве.

6. Накопление химических элементов в побегах сосны зависит от их возраста. Отмечен тренд снижения содержания минеральных элементов с возрастом побегов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнова Н.Н. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Репродуктивный потенциал плюсовых деревьев. Н. Новгород: НГСА, 2015. 586 с.

Besschetnova N.N. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). Reproductive Potential of Plus Trees. Nizhniy Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy Publ., 2015. 586 p. (In Russ.).

2. Бобкова К.С. Экологические основы продуктивности хвойных лесов Европейского Северо-Востока: автореф. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 1990. 35 с.

Bobkova K.S. Ecological Basis of Coniferous Forests Productivity of the European North-East: Doct. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1990. 35 p. (In Russ.).

3. Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Сенькина С.Н., Галенко Э.П., Загирова С.В. Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов Европейского Северо-Востока. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1993. 176 с.

Bobkova K.S., Tuzhilina V.V., Sen'kina S.N., Galenko E.P., Zagirova S.V. *Ecological and Physiological Basis of Productivity of Pine Forests of the European Northeast*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of Ural Branch of the RAS, 1993. 176 p. (In Russ.).

4. Веретенников А.В. Физиология растений с основами биохимии. Воронеж: ВГУ, 1987. 254 с.

Veretennikov A.V. *Plant Physiology with the Basics of Biochemistry*. Voronezh, Voronezh State University Publ., 1987. 254 p. (In Russ.).

5. Ивонис И.Ю. Регуляторы роста в микростробиллах хвойных пород Карелии // Совещание по лесной генетике, селекции и семеноводству: тез. докл. Петрозаводск, 1967. С. 57–59.

Ivonis I.Yu. Growth Regulators in Microstrobilli of Coniferous Species of Karelia. *Meeting on Forest Genetics, Breeding and Seed Production: Abstracts*. Petrozavodsk, 1967, pp. 57–59. (In Russ.).

6. Казимиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1977. 304 с.

Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zyabchenko S.S., Ivanchikov A.A., Morozova R.M. *Metabolism and Energy Change in Pine Forests of the European North*. Leningrad, Nauka Publ. (Leningrad Branch), 1977. 304 p. (In Russ.).

7. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 464 с.

Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 464 p. (In Russ.).

8. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Абрис, 2011. 783 с.

Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. *Plant Physiology*. Moscow, Abris Publ., 2011. 783 p. (In Russ.).

9. Либберт Э. Физиология растений. М.: Мир, 1976. 582 с.

Libbert E. *Plant Physiology*. Moscow, Mir Publ., 1976. 582 p. (In Russ.).

10. Лиханова Н.В. Влияние сплошнолесосечной рубки на круговорот азота и зольных элементов в ельниках средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2015. 22 с.

Likhanova N.V. *The Effect of Continuous Logging on the Circulation of Nitrogen and Ash Constituents in the Spruce Forests of the Middle Taiga*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Syktyvkar, 2015. 22 p. (In Russ.).

11. Пристова Т.А. Биологический круговорот азота и зольных элементов в лиственно-хвойном насаждении подзоны средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2003. 19 с.

Pristova T.A. *Biological Cycle of Nitrogen and Ash Constituents in Deciduous-Coniferous Plantations of the Middle Taiga Subzone*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Syktyvkar, 2003. 19 p. (In Russ.).

12. Тарханов С.Н. Содержание серы и тяжелых металлов в хвойных насаждениях бассейна Северной Двины при аэротехногенном загрязнении // Лесоведение. 2011. № 3. С. 26–33.

Tarkhanov S.N. The Content of Sulfur and Heavy Metals in Soils and Needles of Coniferous Stands under Aerotechnogenic Pollution in the Severnaya Dvina River Basin. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2011, no. 3, pp. 26–33. (In Russ.).

13. Феклистов П.А., Хабарова Е.П. Ассимиляционный аппарат деревьев сосны на осушенных и избыточно увлажненных почвах. Архангельск: САФУ, 2017. 141 с.

Feklistov P.A., Khabarova E.P. *Assimilation Apparatus of Pine Trees on Drained and Overly Moistened Soils*. Arkhangelsk, Northern Arctic Federal University Publ., 2017. 141 p. (In Russ.).



14. Codesido V., Fernandes-Lopes J. Using SYNCHRO SAS, a Program to Facilitate Phenological Data Processing in a Radiate Pine Seed Orchard in Northern Spain. *Seed Orchards: Proceedings from a Conference at Umea, Sweden*. Sweden, Uppsala, SLU/Publikationsanst Publ., 2008, pp. 43–49. <https://doi.org/10.13140/2.1.4524.6088>
15. Conn S., Gilliam M. Comparative Physiology of Elemental Distributions in Plants. *Annals of Botany*, 2010, vol. 105, iss. 7, pp. 1081–1102. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq027>
16. Kurm M., Kängsepp L., Kiviste A., Sims A., Maaten T., Kaljurand H. Hariliku Männi (*Pinus sylvestris* L.) Plusspuud Eestis = Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Plus Trees in Estonias. *Forestry studies. Metsanduslicud Uurimused*, 2007, vol. 46, pp. 57–76. (In Est.).
17. Kurt Y., Bilgen B.B., Kaya N., Isik K. Genetic Comparison of *Pinus brutia* Ten. Populations from Different Elevations by RAPD Markers. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2011, vol. 39, no. 2, pp. 299–304. <https://doi.org/10.15835/nbha3926276>
18. Pongrac P., Baltrenaite E., Vavpetič P., Kelemen M., Kladnik A., Budič B., Vogel-Mikuš K., Regvar M., Baltrenas P., Pelicon P. Tissue-Specific Element Profiles in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Needles. *Trees*, 2019, vol. 33, pp. 91–101. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1761-5>
19. Rautio P., Huttunen S. Total vs. Internal Element Concentrations in Scots Pine Needles along a Sulphur and Metal Pollution Gradient. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 122, pp. 273–289. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00289-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00289-0)
20. Silva da J.M., Aguiar A.V., Mori E.S., Moraes de M.L.T. Variação Genética e Ganho Esperado na Seleção de Progenies de *Pinus caribaea* var. *caribaea* em Selvíria, MS = Genetic Variation and Expected Gain in Selection of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Progenies in Selvíria, MS. *Scientia Forestalis, Piracicaba*, 2011, vol. 39, no. 90, pp. 241–252. (In Port.).
21. Tian X., Minunno F., Schiestl-Aalto P., Chi J., Zhao P., Peichl M., Marshall J., Näsholm T., Lim H., Peltoniemi M., Linder S., Mäkelä A. Disaggregating the Effects of Nitrogen Addition on Gross Primary Production in a Boreal Scots Pine Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, vol. 301–302, art. no. 108337. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108337>
22. Zeiner M., Kuhar A., Juranović Cindrić I. Geographic Differences in Element Accumulation in Needles of Aleppo Pines (*Pinus halepensis* Mill.) Grown in Mediterranean Region. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 10, art. no. 1877. <https://doi.org/10.3390/molecules24101877>

**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\*18;581.54

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-130-139

## Влияние аэрозолей на лесорастительный покров в юго-западном регионе Азербайджана

**В.М. Мамедалиева**<sup>1✉</sup>, канд. геогр. наук; *ResearcherID*: [AAC-5454-2021](https://orcid.org/0000-0002-8775-8564),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>

**Г.С. Гейдарзаде**<sup>2</sup>, соискатель, ст. лаборант;

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8216-0320>

<sup>1</sup>Азербайджанское национальное аэрокосмическое агентство, Институт экологии, ул. С.С. Ахундова, д. 1, г. Баку, Азербайджанская Республика, AZ1115; [valide.mamedaliyeva@mail.ru](mailto:valide.mamedaliyeva@mail.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>Бакинский государственный университет, ул. 3. Халилова, д. 23, г. Баку, Азербайджанская Республика, AZ1148; [gumudlu@bsu.edu.az](mailto:gumudlu@bsu.edu.az)

*Поступила в редакцию 07.07.23 / Одобрена после рецензирования 03.10.23 / Принята к печати 06.10.23*

**Аннотация.** Загрязнение атмосферы антропогенными выбросами приводит к увеличению содержания в воздухе аэрозолей. Это вызывает искажения данных дистанционного зондирования Земли в видимых диапазонах. Таким образом, затрудняется использование вегетационных индексов, в частности нормализованного дифференциального индекса растительности NDVI. В связи с этим в последнее время возрос интерес к применению спутниковых снимков, полученных в коротковолновых инфракрасных диапазонах SWIR1 и SWIR2. В отличие от NDVI, при расчете индексов AFRI-1600 и AFRI-2100 учитываются значения этих диапазонов (вместо видимого красного). Поэтому данные индексы получили название индексов, свободных от аэрозолей. В статье рассматриваются вопросы одновременного использования индексов NDVI и AFRI. Исследования проводились в 3 районах, лежащих в юго-западной части Азербайджана. В качестве исходных данных были взяты снимки 2000 и 2021 гг., полученные с помощью спутников Landsat-5 и Landsat-8 соответственно. Сканеры этих спутников имеют диапазоны 1600 и 2100 мкм. Исследование проходило в несколько этапов. На 1-м этапе были вычислены индексы AFRI-1600 и определены территории с высоким содержанием аэрозолей для указанных годов. Путем изучения динамики количества аэрозолей выделены участки 2 типов. Участки 1-го типа – те, на которых в 2000 г. содержание аэрозолей было высоким, но в 2021 г. опустилось. На участках 2-го типа ранее не фиксировалось высокое значение показателя, но в 2021 г. оно отмечено. Для обеих категорий получено значение индекса NDVI и проведена классификация покрытия участков. Результаты наложения карт индексов друг на друга показали, что рост содержания аэрозолей соответствует сокращению густоты растительности и, наоборот, понижение – увеличению этого показателя. Таким образом, повышенное содержание аэрозолей отрицательно влияет на состояние лесного покрова. Это подтверждается картами индекса состояния растительности VCI. **Ключевые слова:** лесная растительность, аэрозоли, вегетационный индекс, AFRI-1600, NDVI, VCI, юго-западный регион Азербайджана



*Для цитирования:* Мамедалиева В.М., Гейдарзаде Г.С. Влияние аэрозолей на лесорастительный покров в юго-западном регионе Азербайджана // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 130–139. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-130-139>

## The Influence of Aerosols on Forest Vegetation Cover in the South-West of Azerbaijan

*Valida M. Mamedaliyeva*<sup>1</sup>✉, Candidate of Geography; ResearcherID: [AAC-5454-2021](https://orcid.org/0000-0002-8775-8564),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8775-8564>

*Gunel S. Heydarzade*<sup>2</sup>, Aspirant, Senior Laboratory Assistant;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8216-0320>

<sup>1</sup>Azerbaijan National Aerospace Agency, Institute of Ecology, ul. S.S. Akhundova, 1, Baku, AZ1115, Republic of Azerbaijan; [valide.mamedaliyeva@mail.ru](mailto:valide.mamedaliyeva@mail.ru)✉

<sup>2</sup>Baku State University, ul. Z. Khalilova, 23, Baku, AZ1148, Republic of Azerbaijan; [gumudlu@bsu.edu.az](mailto:gumudlu@bsu.edu.az)

---

Received on July 7, 2023 / Approved after reviewing on October 3, 2023 / Accepted on October 6, 2023

---

**Abstract.** Atmospheric pollution by anthropogenic emissions leads to an increase in the content of aerosols in the air. This causes distortions in the Earth remote sensing data in the visible ranges. Thus, the use of vegetation indices, in particular, the normalized differential vegetation index (NDVI), is difficult. In this regard, interest in the use of satellite images obtained in the short-wave infrared bands SWIR1 and SWIR2 has recently increased. Unlike NDVI, when calculating the AFRI-1600 and AFRI-2100 indices, the values of these bands are taken into account (instead of visible red). Therefore, these indices are called aerosol-free. The article addresses the issues of the NDVI and AFRI indices. The studies have been carried out in three regions located in the south-west of Azerbaijan. The initial data has been taken from 2000 and 2021 images obtained using the Landsat-5 and Landsat-8 satellites, respectively. The scanners of these satellites have ranges of 1600 and 2100  $\mu\text{m}$ . The study has taken place in several stages. At the first stage, the AFRI-1600 indices have been calculated and the areas with high aerosol content for the indicated years have been identified. By studying the dynamics of the amount of aerosols, two types of sites have been identified. Type 1 sites are those where the aerosol content was high in 2000, but dropped in 2021. In type 2 sites, a high value of this indicator was not previously recorded, but was noted in 2021. The NDVI index value has been obtained for both categories, and the classification of the site coverage has been carried out. The results of superimposing index maps on each other have shown that an increase in aerosol content corresponds to a decrease in vegetation density, and vice versa, a decrease in aerosols corresponds to an increase in this indicator. Thus, the increased aerosol content has a negative effect on the condition of forest cover. This is confirmed by the VCI (vegetation condition index) maps.

**Keywords:** forest vegetation, aerosols, vegetation index, AFRI-1600, NDVI, VCI, south-west of Azerbaijan

**For citation:** Mamedaliyeva V.M., Heydarzade G.S. The Influence of Aerosols on Forest Vegetation Cover in the South-West of Azerbaijan. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 130–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-130-139>

*Введение*

Одним из самых серьезных вызовов человечеству в настоящее время являются климатические изменения вследствие интенсивной хозяйственной деятельности. Главным инструментом исследований в этой области остаются дистанционные измерения. Аэрокосмический мониторинг состояния отдельных компонентов природной среды позволяет выявить регионы с активизацией негативных геоэкологических процессов. Важное направление аэрокосмического мониторинга – исследование состояния лесной растительности и ее динамики, что эффективно проводится путем сравнения разновременных снимков [2].

Возросшее в значительной степени количество антропогенных выбросов углекислого газа, метана и других химически активных газов способствует образованию вторичных загрязнителей, в т. ч. аэрозольных частиц [4]. Вследствие этого наблюдается существенное изменение природных биогеохимических циклов.

Аэрозоль – это дисперсная система, состоящая из газообразной дисперсионной среды и твердой или жидкой дисперсной фазы, иначе говоря, это взвесь твердых или жидких частиц в газе [3]. Диаметр аэрозольных частиц колеблется от 1 до 100 мкм. Эти мельчайшие частицы различной формы и размеров, взвешенные в воздухе, имеют как естественное (запыленный воздух, дым, туман), так и техногенное (выбросы в атмосферу заводов и теплостанций, выхлопы автомобилей) происхождение [6].

Атмосферные аэрозоли играют важную роль в решении многих задач, связанных с физикой атмосферы, к числу которых можно отнести распространение оптической радиации, фотохимические процессы, возникновение облаков и др.

Наличие в воздухе аэрозолей снижает эффективность методов дистанционного зондирования Земли [1]. Аэрозоли вносят искажения в результаты мультиспектрального анализа, применяемого при обработке спутниковых снимков, в частности при расчете нормализованного разностного индекса растительности NDVI [16, 18]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – значения пикселей в ближнем инфракрасном канале (канал 4 на Landsat-5 и канал 5 на Landsat-8); RED – значения пикселей в красном канале (канал 3 на Landsat-5 и канал 4 на Landsat-8).

Причина в том, что аэрозоль увеличивает отражательную способность в красной полосе за счет рассеяния солнечного света и снижает в ближней инфракрасной области за счет его поглощения. Это может привести к неверным результатам при вычислении различных параметров растительности, например зеленой биомассы, концентрации хлорофилла или фотосинтетической активности [9, 17, 20].

Кроме аэрозолей, на вегетационные индексы влияет чувствительность к почвенному фону, особенно влажному. Также существует ограничение значений индекса в большую сторону при плотном пологом леса.

Цель исследования – определение содержания аэрозолей в атмосфере и их влияния на лесорастительный покров 3 юго-западных районов Азербайджана: Лачинского, Губадлинского и Зангеланского.

*Объекты и методы исследования*

В связи с ограничениями применения вегетационных индексов часто использовались их модифицированные выражения, например индекс растительности с поправкой на почву SAVI [10].

По мере повышения спектрального разрешения спутников появляется больше инновационных возможностей [15]. Одновременно с ростом числа модификаций вегетационных индексов повышается интерес к применению коротковолновых инфракрасных каналов SWIR1 и SWIR2. Диапазон SWIR1 (1,6 мкм) наиболее чувствителен к содержанию жидкой воды в листьях [19]. Использование SWIR2 (2,1 мкм) было предложено для дистанционного зондирования аэрозолей над сушей и атмосферной коррекции изображений Земли [11]. Этот диапазон также чувствителен к содержанию жидкой воды, но характеризуется более низкой отражательной способностью и может лучше имитировать NDVI без аэрозольных помех. Диапазон SWIR2 расположен в одном из атмосферных окон и меньше подвержен влиянию атмосферных газов, таких как кислород, озон, пары воды, углекислый газ и др. Длина волны этого диапазона больше, чем размер распространенных типов аэрозолей.

Таким образом, у диапазонов SWIR1 и SWIR2 есть способность проникновения в атмосферный столб даже при наличии аэрозолей, таких как дым или сульфаты. Индексы с учетом SWIR-диапазона получили название индексов, свободных от аэрозолей (Aerosol Free Vegetation Index – AFRI). Формулы для их вычисления следующие [12, 13]:

$$\text{AFRI-1600} = (\text{NIR} - 0,66 \cdot \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + 0,66 \cdot \text{SWIR1});$$

$$\text{AFRI-2100} = (\text{NIR} - 0,5 \cdot \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + 0,5 \cdot \text{SWIR2}),$$

где SWIR1 и SWIR2 – значения пикселей в коротковолновых инфракрасных каналах (канал 5 на Landsat-5 и каналы 6 и 7 на Landsat-8).

В условиях отсутствия облачности данные индексы – особенно AFRI-2100 – идентичны NDVI, поэтому широко используются при оценке растительности в условиях задымления, антропогенного загрязнения или вулканических шлейфов.

Процесс исследования происходил в несколько этапов. На 1-м этапе рассчитывался индекс AFRI-1600 по спутниковым снимкам 2000 (Landsat-5) и 2021 (Landsat-8) гг. По значениям индекса территории классифицировались следующим образом: с высоким уровнем аэрозолей –  $-0,7 \dots -0,3$ ; со средним –  $-0,3 \dots -0,1$ ; со слабым –  $-0,1 \dots 0,3$ ; с отсутствием аэрозолей –  $0,3 \dots 0,7$ .

На 2-м этапе определялись участки, где заметно изменялось содержание аэрозолей. На заключительном этапе на карты этих участков накладывались карты NDVI. Таким образом, выяснялась связь NDVI и динамики AFRI. Для наглядности добавлены карты значений индекса состояния растительности VCI. Расчет индекса осуществлялся для каждого пикселя изображения текущего значения NDVI путем его сравнения с минимальным и максимальным значениями NDVI, полученными в предыдущие годы, согласно формуле

$$\text{VCI} = 100 (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}).$$

Индекс может принимать значения от 0 до 100 %. Минимальное и максимальное значения обозначают наихудшее и наилучшее состояния растительности в рассматриваемом регионе соответственно. При нормальном состоянии растительного покрова индекс составляет около 50 % [14].

В качестве исходных данных использовались результаты обработки космических снимков для юго-западного региона Азербайджана – Лачинского, Губадлинского и Зангеланского районов. Снимки были получены с сайта <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Предварительная обработка изображений включала проведение радиометрической калибровки и атмосферной коррекции [5].

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показаны карты со значениями индекса AFRI-1600 для изучаемых территорий. Расчет индекса был сделан в программе ArcGIS [7, 8]. Значения индекса получены автоматически и разделены на 13 диапазонов.

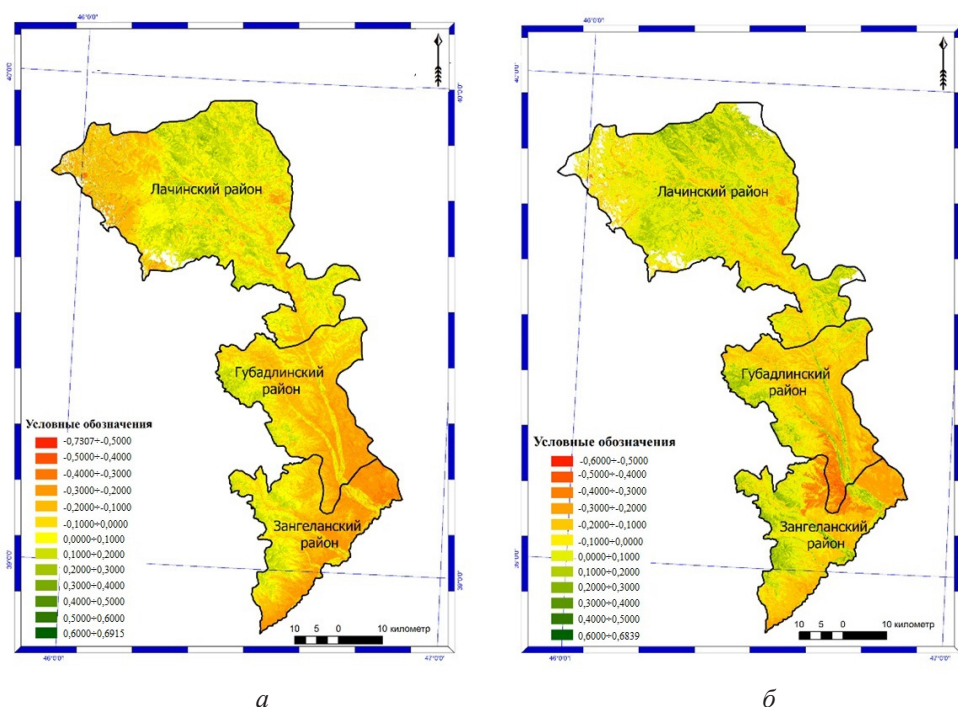


Рис. 1. Значения индекса AFRI-1600 на территории исследования по данным 2000 (а) и 2021 (б) гг.

Fig. 1. The AFRI-1600 index values in the study area according to the data from 2000 (a) and 2021 (b) гг.

Как видно из рис. 1, максимальное значение индекса AFRI-1600 составляет 0,69, а минимальное равняется  $-0,7$ . Весь диапазон значений был разделен на 4 класса. Результаты классификации показаны на рис. 2. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные только с 1-м классом, т. е. с наиболее высоким содержанием аэрозолей.

Далее определялась динамика площадей для каждого из классов. Эти данные показаны в табл. 1. На рис. 3 приведены территории, на которых наблюдается понижение содержания, от высокого до более низкого уровня, увеличение до высокого и те, на которых высокий уровень остался без изменений.

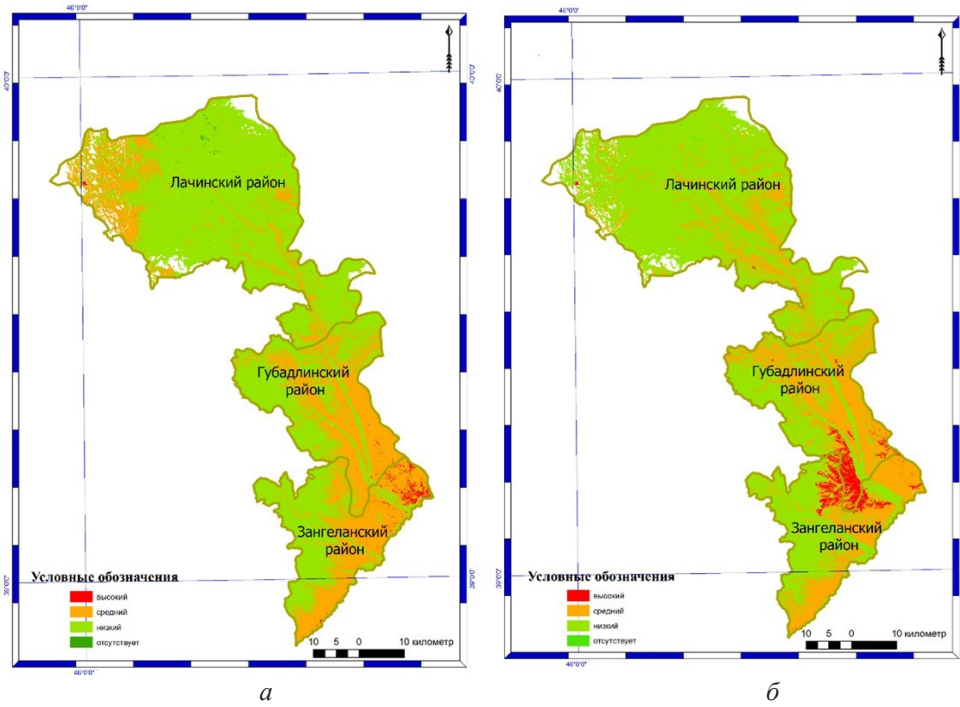


Рис. 2. Результаты классификации территорий по уровням индекса AFRI-1600 для 2000 (а) и 2021 (б) гг.

Fig. 2. The results of classification of the territories by the AFRI-1600 index levels for 2000 (a) and 2021 (b)

Таблица 1

**Площади территорий с разным содержанием аэрозолей**  
**The areas of the territories with different aerosol content**

Уровень содержания аэрозолей	Площадь, га		
	2000 г.	2021 г.	Динамика
Высокий	2260	8044	5784↑
Средний	102 476	94 920	7556↓
Низкий	206 674	206 126	548↓
Отсутствие	846	447	399↓

Примечание: Здесь и в табл. 2 ↑ – рост; ↓ – снижение.

Согласно рис. 3, рост площади с высоким уровнем содержания аэрозолей в основном происходит на стыке Губадлинского и Зангеланского районов. После разделения территорий на 4 класса становится возможным с помощью индекса NDVI классифицировать их покрытие и тем самым определить влияние аэрозолей для 2 случаев: увеличения содержания аэрозолей до высокого уровня и уменьшения содержания ниже высокого уровня. Результаты исследования для обоих случаев приведены в табл. 2



Рис. 3. Динамика содержания аэрозолей для территорий с их высоким уровнем в 2000 и 2021 гг.

Fig. 3. The dynamics of aerosol content for the areas with their high levels in 2000 and 2021

Исходя из данных табл. 2, на территориях с увеличением AFRI-1600 до высокого уровня в 2000 г. большую часть площадей составляли кустарники и пастбища, а в 2021 г. наиболее увеличилась не покрытая лесом площадь. Голые и редкие деревья и кустарники и сильная густая кустарниковая растительность значительно уменьшились в 2021 г.

Исходя из данных второй части табл. 2 (территории с уменьшением AFRI-1600 ниже высокого уровня), к 2021 г. безлесная площадь ощутимо сократилась, а кустарниковая и пастбищная площади приросли больше, чем другие территории.

Таблица 2

**Площади территорий с различными видами покрытия на основе индекса NDVI при разной динамике AFRI-1600**

**The areas of territories with different types of coverage based on the NDVI index at different dynamics of the AFRI-1600 index**

Тип покрытия на основе расчета индекса NDVI	Площадь, га		
	2000 г.	2021 г.	Динамика
<i>Территории с увеличением AFRI-1600 до высокого уровня</i>			
Горные виды растительности, песок, снег	6,10	11,42	5,32 ↑
Водные объекты	0,72	7,76	7,04 ↑
Безлесные территории	388,40	3772,89	3384,49↑
Кустарники и пастбища	4292,88	3965,77	327,11 ↓
Редкие деревья и кустарники	1682,19	4,89	1677,3 ↓
Густая кустарниковая растительность	1274,04	3,18	1270,86 ↓
Густая лесная растительность	119,46	0	119,46 ↓
Очень густая лесная растительность	0,45	0	0,45 ↓



Окончание табл.2

<i>Территории с уменьшением AFRI-1600 ниже высокого уровня</i>			
Горные виды растительности, песок, снег	26,05	8,11	17,94↓
Водные объекты	3,11	110,58	107,47 ↑
Безлесные территории	1425,41	449,19	976,22 ↓
Кустарники и пастбища	506,16	1230,36	724,20 ↑
Редкие деревья и кустарники	7,57	55,26	47,69 ↑
Густая кустарниковая растительность	4,09	82,85	78,76↑
Густая лесная растительность	0,27	37,74	37,47↑
Очень густая лесная растительность	0	2,60	2,60 ↑

На основании показателей, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод о том, что на территориях с увеличением содержания аэрозолей наблюдаются уменьшение индекса NDVI и, соответственно, ослабление лесорастительного покрова. На территориях с понижением содержания аэрозолей в воздухе ситуация обратная – растительность становится гуще. На рис. 4 даны карты, построенные на основании расчета индекса состояния растительности VCI.

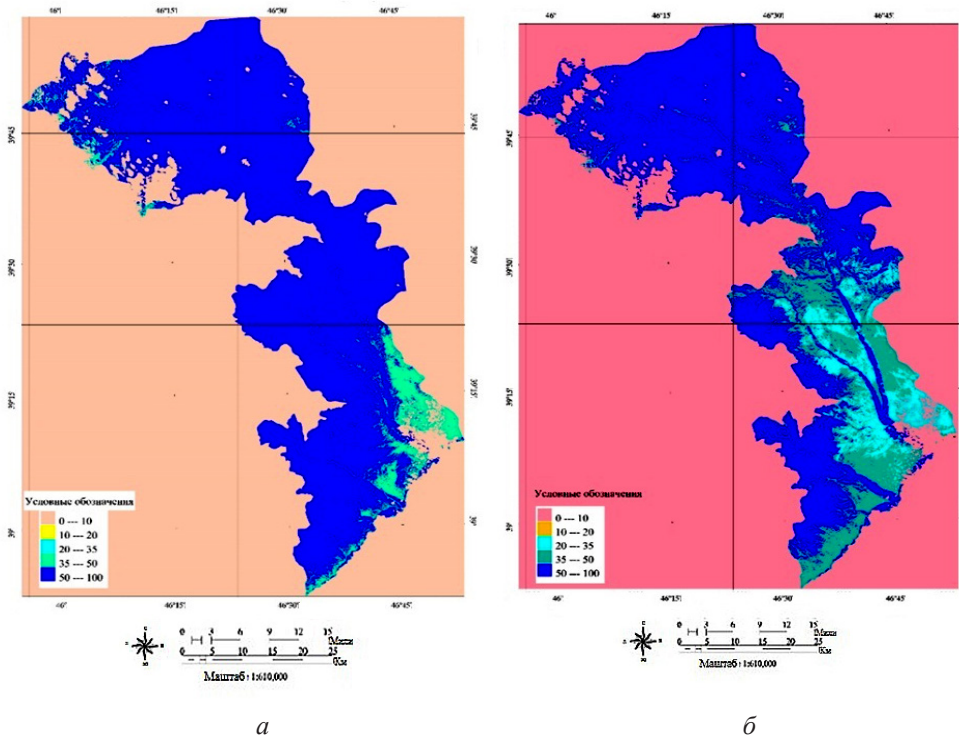


Рис. 4. Карты индекса состояния растительности в 2000 (а) и 2021 (б) гг.  
 Fig. 4. The vegetation condition index maps in 2000 (a) and 2021 (b)

## Заключение

Исследования в указанном регионе Азербайджана имеют широкие перспективы в связи с утвержденной программой по освоению и быстрейшему развитию этих территорий в 2025–2030 гг. Особое место занимают здесь исследования в области лесного хозяйства. Заявленная в статье тема: связывание динамик изменения двух индексов – NDVI и AFRI – не представлена в открытом сегменте Интернета, поэтому в определенной степени является пионерной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агаев Ф.Г., Алиева Г.В. Исследование влияния аэрозоля на точность определения нормализованного дифференциального водного индекса растений // Вестн. Алтай. гос. аграр. ун-та. 2013. № 9(107). С. 27–29.  
Agayev F.G., Aliyeva G.V. Study of Aerosol Effect on Determination Accuracy of Normalized Differential Water Content Index of Plants. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agrarian University, 2013, no. 9(107), pp. 27–29. (In Russ.).
2. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Аэрокосмические методы в системе геоэкологического мониторинга природно-техногенных территорий // Теорет. и приклад. экология. 2017. № 3. С. 15–24.  
Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Aerospace Methods in the System of Geo-Ecological Monitoring of Natural and Anthropogenic Areas. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology, 2017, no. 3, pp. 15–24. (In Russ.). <https://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2017-3-015-024>
3. Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей: курс лекций. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2008. 228 с.  
Beresnev S.A., Gryazin V.I. *Physics of Atmospheric Aerosols: A Course of Lectures*. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2008. 228 p. (In Russ.).
4. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII, № 5. С. 112–119.  
Ginzburg A.S., Gubanova D.P., Minashkin V.M. Influence of Natural and Anthropogenic Aerosols on Global and Regional Climate. *Rossijskij khimicheskij zhurnal (Zhurnal Rossijskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva)* = Russian Journal of General Chemistry, 2008, vol. LII, no. 5, pp. 112–119. (In Russ.).
5. Горбачева Е.Н. Программный комплекс ENVI – профессиональное решение для комплексной обработки мультиспектральных, гиперспектральных и радарных данных // Геоматика. 2013. № 2. С. 50–54.  
Gorbacheva E.N. ENVI Software – Professional Solution for Complex Multispectral, Hyperspectral and Radar Data Processing. *Geomatika* = Geomatics, 2013, no. 2, pp. 50–54. (In Russ.).
6. Ивлев Л.С. Механизмы образования и распада атмосферных аэрозолей и облачности и их экологическое значение // Биосфера. 2013. Т. 5, № 2. С. 182–210.  
Ivlev L.S. Mechanisms of Generation and Decay of Atmospheric Aerosols and Clouds and Their Ecological Significance. *Biosphera* = Biosphere, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 182–210. (In Russ.).
7. Семейство программных продуктов ArcGIS. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/7154583/page:2/> (дата обращения: 18.04.24).  
*ArcGIS Software Product Family*. <https://studfile.net/preview/7154583/page:2/> (In Russ.).

8. Чащин А.Н. Основы обработки спутниковых снимков в QGIS / Перм. гос. аграр.-технол. ун-т им. акад. Д.Н. Прянишникова. Пермь: ПрокростЪ, 2018. 47 с.  
Chaschin A.N. *The Basics of Processing Satellite Images in QGIS*. Perm State Agro-Technological University. Perm, Prokrost, 2018. 47 p. (In Russ.).
9. Buschmann C., Nagel E. *In vivo* Spectroscopy and Internal Optics of Leaves as Basis for Remote Sensing of Vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, vol. 14, pp. 711–722. <https://doi.org/10.1080/01431169308904370>
10. Huete A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of the Environment*, 1988, vol. 25, iss. 3, pp. 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
11. *Index DataBase. A Database for Remote Sensing Indices*. Available at: <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=393> (accessed: 26.02.23).
12. Karnieli A., Kaufman Y.J., Remer L., Wald A. AFRI – Aerosol Free Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 2001, no. 77, iss. 1, pp. 10–21. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00190-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00190-0)
13. Kaufman Y.J., Wald A.E., Remer L.A., Gao B.-C., Li R.-R., Flynn L. The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  Channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, vol. 35, iss. 5, pp. 1286–1298. <https://doi.org/10.1109/36.628795>
14. Kogan F.N. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-Homogeneous Areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, vol. 11, iss. 8, pp. 1405–1419. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
15. Liu G.-R., Liang C.-K., Kuo T.-H. Comparison of the NDVI, ARVI and AFRI Vegetation Index, Along with Their Relations with the AOD Using SPOT 4 Vegetation Data. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences Journal*, 2004, vol. 15, no. 1, pp. 15–31. [https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.1.15\(A\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.1.15(A))
16. *NDVI: Normalized Differential Vegetation Index*. Available at: <https://eos.com/ru/make-an-analysis/ndvi> (accessed: 26.05.22).
17. Sellers P.J. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, vol. 6, iss. 8, pp. 1335–1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
18. *Sentinel-2 RS Indices*. Available at: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/indexdb/> (accessed: 20.11.21).
19. Tucker C.J. A Critical Review of Remote Sensing and Other Methods for Non-Destructive Estimation of Standing Crop Biomass. *Grass and Forage Science*, 1980, vol. 35, iss. 3, pp. 177–182. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1980.tb01509.x>
20. Tucker C.J. Red and Photographic Infrared Linear Combination for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

**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\*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-140-152

### Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции

*В.А. Каляшов<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>*

*В.Я. Шапиро<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>*

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

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

*О.А. Куницкая<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>*

*И.С. Должиков<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>*

*В.П. Друзьянова<sup>4</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),*

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

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; shapiro54vlad@mail.ru

<sup>3</sup>Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

<sup>4</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, Россия, 677000; druzvar@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.23 / Одобрена после рецензирования 20.01.24 / Принята к печати 22.01.24

**Аннотация.** В Российской Федерации значительная часть территории лесного фонда расположена на вечной мерзлоте. Многие регионы страны обладают большими запасами спелых и перестойных эксплуатационных лесов, причем значительная часть этих запасов находится в труднодоступных местах, не только ввиду недостаточно развитой дорожной сети, но и из-за сложного рельефа местности. В настоящее время подавляющий объем заготовок древесины в России производится при помощи современных машинных комплексов, в основном включающих колесные лесные машины различных компоновки и назначения (харвестеры, форвардеры, скиддеры и т. д.). При этом проблема негативного воздействия на почву лесных машин и трелевочных систем на их базе не просто остается актуальной, а приобретает еще большую остроту, поскольку экосистемы горных лесов, лесов на склонах сопки и др. относятся к наиболее ранимым, подверженным водной и ветровой эрозии. Как

© Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П., 2024

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

известно, колея в почвогрунте формируется под воздействием нормальной нагрузки, передаваемой через пятно контакта движителя, а также под воздействием касательной силы, реализуемой движителем при перемещении машины. При подъеме машины на склон требуется большая касательная сила тяги движителя, чем при перемещении по равнине. Следовательно, на склоне интенсивность образования колеи при прочих равных условиях выше. Известны системы машин, в которых используются лебедки, помогающие машинам спускаться и подниматься по склону. Лебедки могут быть как отдельными, так и интегрированными в трансмиссию машин агрегатами. Исследование показало, что использование лебедок при подъеме машины на склон существенно уменьшает расход топлива и нагрузки в трансмиссии, что является следствием снижения необходимой для перемещения машины касательной силы тяги, реализуемой движителем. Таким образом, интенсивность образования колеи на склоне при работе машины с лебедкой меньше по сравнению с работой без лебедки.

**Ключевые слова:** леса на склонах, леса на вечной мерзлоте, лесозаготовка, лесные машины, трелевочные системы, солифлюкция, образование колеи

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

**Для цитирования:** Каляшов В.А., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Должиков И.С., Друзьянова В.П. Формирование колеи движителем лесной машины на склоне оттаивающего почвогрунта криолитозоны с учетом эффекта солифлюкции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 140–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-140-152>

Original article

### The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction

*Vitalij A. Kalyashov*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

*Vladimir Ya. Shapiro*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9658-2020](https://orcid.org/0000-0002-6344-1239),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6344-1239>

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

*Ol'ga A. Kunitskaya*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-9568-2020](https://orcid.org/0000-0001-8542-9380),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

*Il'ya S. Dolzhikov*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Varvara P. Druz'yanova*<sup>4</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAG-2463-2019](https://orcid.org/0000-0001-5409-3837),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; vit832@yandex.ru, idolzhikov222@mail.ru

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; shapiro54vlad@mail.ru

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoe, 3rd km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru, ola.ola07@mail.ru

<sup>4</sup>М.К. Ammosov North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000, Russian Federation; druzvar@mail.ru

*Received on October 26, 2023 / Approved after reviewing on January 20, 2024 / Accepted on January 22, 2024*

**Abstract.** In the Russian Federation, a significant part of the forest fund territory is located on permafrost. Many regions of the country have large reserves of mature and overmature commercial forests, and a significant part of these reserves are located in hard-to-reach places, not only due to the underdeveloped road network, but also due to the difficult terrain. Currently, the vast majority of timber harvesting in Russia is carried out using modern machine complexes, mainly including wheeled forestry machines of various layouts and purposes (harvesters, forwarders, skidders, etc.). At the same time, the problem of the negative impact on the soil of forestry machines and skidding systems based on them not only remains relevant, but becomes even more acute, since the ecosystems of mountain forests, forests on the slopes of hills, etc. are among the most vulnerable, subject to water and wind erosion. As is known, the track in the soil is formed under the influence of normal load transmitted through the contact spot of the mover, as well as under the influence of the tangential force realized by the mover when moving the machine. When lifting a machine onto a slope, the tangential tractive effort of the propulsion is required than when moving across the plain. Consequently, the intensity of track formation on the slope is higher, all other things being equal. Machine systems are known where, when working on slopes, winches are used to help machines go down and up the slope. Winches can be either separate units or units integrated into the transmission of machines. The research has shown that using winches when lifting the machine onto a slope significantly reduces fuel consumption and transmission loads, which is a consequence of a decrease in the tangential tractive effort required to move the machine, realized by the engine. Then the intensity of track formation on the slope when the machine is working with a winch is less compared to working without a winch.

**Keywords:** forests on the slopes, forests on permafrost, logging, forestry machines, skidding systems, solifluction, track formation

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

**For citation:** Kalyashov V.A., Shapiro V.Ya., Grigor’ev I.V., Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Druz’yanova V.P. The Formation of a Track by the Propulsion of a Forestry Machine on the Slope of the Thawing Soil in the Permafrost Zone, Taking into Account the Effect of Solifluction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 140–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-140-152>

### *Введение*

Для повышения эффективности работы лесных машин при проведении лесосечных и/или лесовосстановительных работ, создания и эксплуатации лесных плантаций, а иногда и борьбы с лесными пожарами на крутых и очень крутых склонах в некоторых странах мира (США, Австрия, Новая Зеландия, Финляндия и др.) созданы и успешно используются системы машин, включающие в себя лебедки [3–5, 19, 20]. При таком варианте существенно снижаются расход топлива, нагрузки в трансмиссиях машин, а так-

же степень повреждения почвогрунтов на склонах лесосек и вырубок. Для того чтобы наглядно проиллюстрировать, как лебедки облегчают для машин въезд на склон, можно привести в качестве примера человека, которому проще подниматься по лестнице с дополнительной помощью рук и перил.

Следует добавить, что при использовании на склонах колесных машин в подавляющем большинстве случаев их тандемные пары оснащаются колесными гусеницами.

Лебедки могут интегрироваться в трансмиссии машин в качестве отдельной дополнительной опции, например лебедки Synchronwinch, устанавливаемые на машины компании Ponsse (рис. 1). Интегрированные лебедки есть также на лесных машинах компаний John Deere, Komatsu Forest, Konrad Forsttechnik GmbH. Основным недостатком такого варианта использования лебедок является то, что монтироваться (и демонтироваться) на лесную машину они могут только на заводе-производителе машин или его партнере – производителе лебедок. Их масса составляет около 1 т, стоимость – от 100 до 200 тыс. евро. То есть при переходе лесозаготовительного предприятия от работ на склонах к работам на равнине смонтированные на лесные машины лебедки становятся «мертвым грузом» (что особенно плохо для трелевочной техники, поскольку существенно повышает удельный расход топлива на 1 м<sup>3</sup> стрелеванной древесины) и замороженными оборотными средствами.

Рис. 1. Харвестер компании Ponsse, оснащенный лебедкой Synchronwinch [10]

Fig. 1. Ponsse harvester equipped with Synchronwinch winch [10]



Другим вариантом является использование отдельных самоходных лебедок на специальной беспилотной гусеничной (T-winch), экскаваторной (Summit Winch Assist) или бульдозерной (ROB) базах (рис. 2) [7]. Как показывает технологический анализ, применение отдельных самоходных лебедок является более предпочтительным, поскольку одна лебедка может последовательно обслуживать разные лесные машины, например сначала работать на склоне с харвестером, а затем с форвардером или сначала с валочно-пакетирующей машиной, а потом со скиддером и т. д. Кроме этого, такие лебедки на равнине могут быть эффективно задействованы в помощи застрявшим в заболоченной почве машинам, служить основой канатных трелевочных или погрузочно-разгрузочных установок. В том или ином случае тяговое усилие лебедки, к которой прикреплена поднимающаяся на склон лесная машина, позволяет последней снижать касательную силу тяги, развиваемую двигателем, а значит, в меньшей степени воздействовать на

поверхность движения и менее интенсивно образовывать колею (рис. 3). Этот эффект не так заметен при спуске лесной машины на лебедке с крутого или очень крутого склона.



а



б



в

Рис. 2. Самоходная лебедка на базе: а – беспилотной гусеничной T-winch; б – экскаваторной Summit Winch Assist; в – бульдозерной ROB [7]

Fig. 2. Self-propelled winch based on: а – an unmanned tracked T-winch; б – an excavator Summit Winch Assist; в – a bulldozer ROB [7]



Рис. 3. Сравнительный вид последствий работ лесных машин на склоне с использованием и без использования лебедки [7]

Fig. 3. A comparative view of the consequences of work of forestry machines on the slope with and without the use of a winch [7]

Исходя из того, что экосистемы лесов на склонах относятся к одним из самых ранимых, тем более лесов на вечной мерзлоте, значимость экологической безопасности проведения работ в таких условиях при помощи тяжелых



лесных машин возрастает кратно, и важной задачей становится разработка методики расчета результатов взаимодействия движителей машин и лесных почвогрунтов [1, 2, 12–14].

Отдельной эксплуатационной и экологической проблемой работы лесных машин на склонах лесов криолитозоны в теплый период года становится эффект солифлюкции – медленного вязкопластического течения на склонах переувлажненных почв и грунтов в условиях их попеременного промерзания и протаивания, действия силы тяжести [8, 9, 11, 17, 18]. Этот эффект активно проявляется при таянии верхнего слоя сезонной мерзлоты, в результате чего находящийся на них массив почвогрунта переувлажняется и сила тяжести стремится спустить его вниз по склону. При работе лесной машины на таком склоне ее касательная сила тяги начинает помогать этому процессу, что может привести к оползню [6].

Исследованию деформативных свойств почвогрунтов на склонах посвящены труды не только отечественных, но и зарубежных ученых [21–26], однако в результате проведенного информационного поиска не встречено работ, в которых учитывался бы эффект солифлюкции.

Цель – рассмотреть деформативные свойства мерзлотных почвогрунтов на склонах с учетом эффекта солифлюкции.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования являются почвогрунты лесов криолитозоны на склонах. Используются справочные данные о физико-механических свойствах почвогрунтов. Расчеты выполнены на основе механики разрушений. Применялись методы аппроксимации численных данных.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Технологические и геомеханические особенности лесозаготовок на склонах лесов криолитозоны в условиях проявления эффекта солифлюкции заключаются в том, что влажность грунта  $W$  приближается к пределу текучести  $W_t$ .

На склоне с углом наклона  $\alpha$  к линии горизонта оттаивающего почвогрунта вблизи границы зоны сезонной мерзлоты груженная лесная машина суммарной массой  $Q$  с гусеничным движителем при направлении движения к вершине склона с использованием лебедки находится под результирующим действием следующих сил:

- 1) тягового усилия лебедки

$$F_d = Q \sin\alpha + \chi Q \cos\alpha,$$

где  $\chi$  – коэффициент трения гусеницы о влажный почвогрунт;

- 2) силы тяги трактора

$$F_t = N/v,$$

где  $N$  – развиваемая мощность двигателя;  $v$  – скорость движения трактора;

- 3) максимальной касательной силы сдвига

$$F_c = \tau S = (C + q \operatorname{tg}\varphi) S,$$

где  $\tau$  – максимальное касательное напряжение сдвига;  $S$  – площадь пятна контакта гусеницы с участком поверхности склона;  $C$  – величина сцепления;

$q$  – давление трактора на почвогрунт в направлении, перпендикулярном поверхности склона;  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Первые две силы действуют в направлении вершины склона, третья – к его основанию.

Параметры паспорта прочности грунта –  $C$  и  $\varphi$  – зависят от влажности и определяются с помощью соотношений [15]. В частности, для оттаивающего суглинка установлено:

$$C = C_c \left( -0,785 \ln \frac{W}{W_c} + 1,0435 \right);$$

$$\varphi = \varphi_c \left( -0,693 \ln \frac{W}{W_c} + 0,8745 \right),$$

где  $C_c = 20$  кПа и  $\varphi_c = 24^\circ$  – параметры, соответствующие сухому состоянию почвогрунта при влажности 15 %.

Таким образом, при приближении  $W$  к пределу текучести  $W_T \approx 40\text{--}45\%$  показатели прочности снижаются: для  $C$  – с 20 до 4,1 кПа, для  $\varphi$  – с 24 до 4,25°, т. е. почти в 5 раз. Такая низкая несущая способность почвогрунта требует тщательной оценки критических нагрузок на него при перемещении лесных машин и трелевочных систем на их базе на склонах и глубины образованной колеи.

При направлении движения к вершине склона баланс сил принимает вид

$$\Delta F = F_n + F_T - F_c > 0.$$

Результирующая сила  $\Delta F$ , отнесенная к площади пятна контакта  $S$ , должна обеспечить суммарное напряжение сдвига на глубину  $h$  массива, не превышающее несущую способность почвогрунта  $p_s$ . Как отмечалось в [16], при разрушении почвогрунта с внутренним трением вертикальные и тангенциальные компоненты тензора напряжений связаны между собой коэффициентом бокового распора  $\mu = \nu/(1-\nu)$ , где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

В предельном состоянии при  $W \rightarrow W_T$  коэффициент Пуассона  $\nu \rightarrow 0,5$  [15], т. е. коэффициент затухания напряжений в глубине массива  $n = 1 - \mu/2 \rightarrow 1/2$ . Значение  $\mu = 1$  означает, что массив почвогрунта находится в состоянии гидростатического сжатия, вертикальные и тангенциальные компоненты принимают близкие значения и в качестве начального давления на почвогрунт можно принять  $q = \Delta F/S$ .

Таким образом, приходим к ограничению на результирующую силу  $\Delta F$  для образования колеи глубиной  $h_k$ :

$$\Delta F \leq p_s S \sqrt{\frac{h_k}{r_k}},$$

где  $r_k$  – радиус пятна контакта,  $r_k = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$ .

В итоге установлено ограничение мощности тяги движителя трактора при следовании к вершине склона с использованием силы тяги лебедки:

$$N \leq S \nu \left[ p_s \sqrt{\frac{h_k}{r_k}} + C + q \operatorname{tg} \varphi - \frac{Q}{S} (\sin \alpha + \chi \cos \alpha) \right].$$

Приняв нормативную глубину колеи  $h_k = h_n = 0,1$  м, произведем расчеты при следующих исходных данных:

используется трактор John Deer 9RT с номинальной мощностью 570 л. с., массой 5,8 т и максимальной нагрузкой 9,072 т. Таким образом, суммарная масса  $Q$  в расчетах изменяется от 5,8 до 14,872 т;

скорость движения трактора принята 1 м/с, площадь пятна контакта гусеницы с грунтом – 5,3884 м<sup>2</sup>, коэффициент трения – 0,05;

угол наклона склона изменяется от 5 до 40°;

несущая способность почвогрунта варьирует в диапазоне от 19,36 до 96,8 кПа, предел текучести грунта – 40–45 %, коэффициент Пуассона – 0,45–0,50.

На рис. 4 при  $\alpha = 20^\circ$  и  $Q = 14$  т представлена зависимость коэффициента  $K_N$ , равного отношению допустимой мощности трактора к номинальной, от величины  $p_s$ .

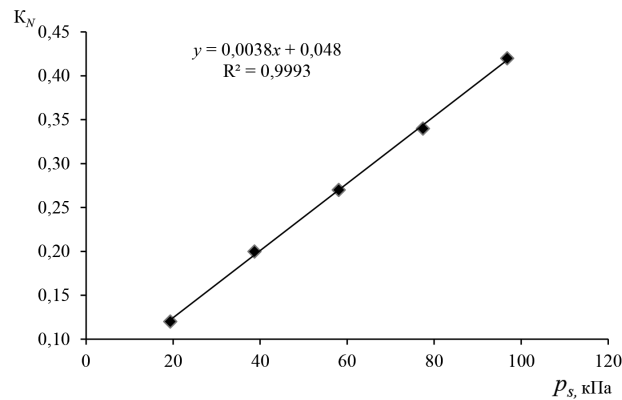


Рис. 4. Влияние несущей способности почвогрунта на мощность трактора

Fig. 4. The effect of soil bearing capacity on the tractor power

Линейный характер связи указывает на то, что при работе на слабых почвогрунтах при проявлении эффекта солифлюкции реализуемая мощность трактора на касательную силу тяги не должна превышать 15–20 % ее номинального значения, для того чтобы глубина колеи не была больше нормативного показателя.

Если задаться целью полностью исключить образование колеи, т. е.  $h_k \rightarrow 0$ , то  $K_N \leq 0,1$ . Это означает, что участие силы тяги трактора будет минимальным по сравнению с силой тяги лебедки, которая и обеспечит движение трактора вверх по склону.

Исследуем влияние угла наклона склона на силу тяги лебедки (рис. 5).

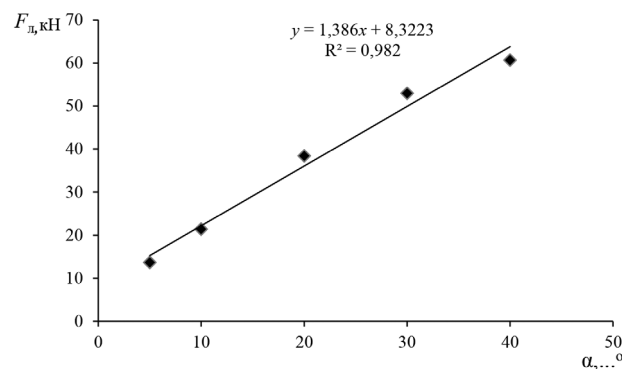


Рис. 5. Влияние угла наклона склона на силу тяги лебедки

Fig. 5. The effect of the slope angle on the winch tractive effort

Установленный коэффициент пропорциональности, равный 1,386 в линейном уравнении связи, являясь производной полученной функции  $F_d(\alpha)$ , свидетельствует о существенной динамике в процессе воздействия угла  $\alpha$  на силу  $F_d$ .

Особое значение для рассматриваемого вопроса представляет исследование влияния массы нагруженного трактора  $Q$  на соотношение сил максимального сдвига и тяги лебедки. Результаты этого исследования представлены на рис. 6. Данные получены при различных значениях угла наклона склона: 10 и 20°.

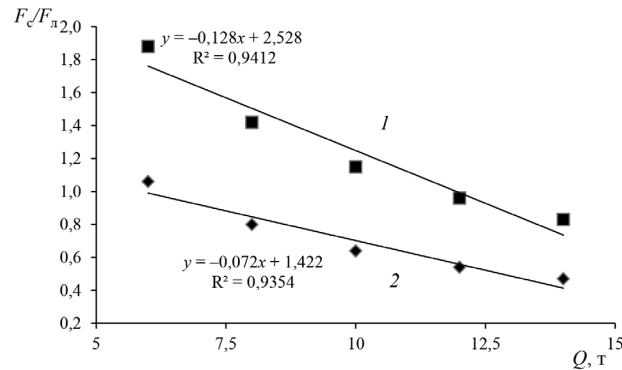


Рис. 6. Влияние массы трактора на соотношение сил сдвига и тяги лебедки при угле наклона склона: 1 – 20°; 2 – 10°

Fig. 6. The effect of the tractor mass on the ratio of shear force and the winch tractive effort at the slope angle: 1 – 20°; 2 – 10°

Как следует из рис. 6, при небольших нагрузках на почвогрунт и углах наклона склона сила тяги лебедки близка к максимальной силе сдвига с определенным положительным балансом. Однако с ростом  $Q$  равновесие нарушается в пользу величины  $F_d$ , существенно превышающей силу  $F_c$  по мере достижения максимальной загрузки трактора. Мощность касательной силы тяги трактора при этом можно минимизировать.

С ростом угла наклона склона проявляется более существенное участие силы  $F_c$  по сравнению с  $F_d$  практически во всем диапазоне суммарной массы  $Q$ . В этой ситуации необходимо дополнительное участие касательной силы тяги трактора в соответствии с ограничением мощности тяги двигателя трактора. И только по достижении максимальных значений  $Q$  ситуация меняется в пользу большего влияния силы тяги лебедки с одновременным снижением реализуемой двигателем мощности трактора.

На рис. 7 отражено совместное воздействие массы трактора  $Q$  и угла  $\alpha$  на силу тяги лебедки.

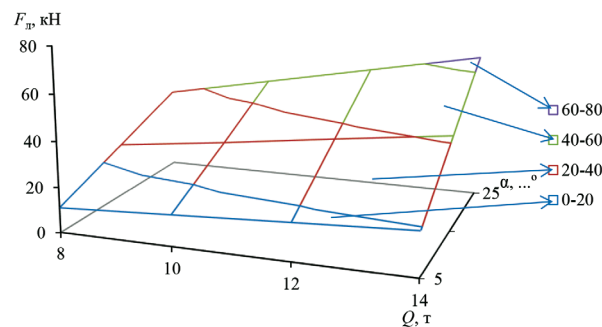


Рис. 7. Влияние массы трактора и угла наклона склона на силу тяги лебедки

Fig. 7. The effect of the tractor mass and the slope angle on the winch tractive effort

Из рис. 7 видно, что с ростом массы лесной машины от 8 до 14 т и угла наклона склона от 5 до 25° сила тяги лебедки увеличивается более чем в 5–6 раз и без соответствующей работы двигателя переместить тяжелый трактор по крутому склону вверх не представляется возможным.

## Заключение

Таким образом, произведенные оценки позволяют в сложных условиях солифлюкции переувлажненного оттаивающего лесного почвогрунта установить необходимые ограничения на касательную силу тяги трактора при использовании лебедок с целью минимизации образования колеи при работах на склонах в криолитозоне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьева О.И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны // Актуал. направления науч. исследований XXI в.: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 25–29.

Grigoreva O.I. Features of Natural Reforestation in the Conditions of the Cryolithozone. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2018, vol. 6, no. 4(40), pp. 25–29. (In Russ.).

2. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 19 апр. 2018 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2018. С. 79–83.

Grigoreva O.I. Efficiency of Transport and Technological Systems for Forestry. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference* (Tyumen', April 19, 2018). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen, 2018, pp. 79–83. (In Russ.).

3. Григорьева О.И., Гринько О.И., Николаева Ф.В. Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колесных форвардеров // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 15 апр. 2021 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2021. С. 55–58.

Grigoreva O.I., Grinko O.I., Nikolaeva F.V. Forest Fire Transport and Technological Complexes Based on Wheeled Forwarders. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference* (Tyumen', April 15, 2021). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen, 2021, pp. 55–58. (In Russ.).

4. Григорьева О.И., Давтян А.Б., Гринько О.И., Войнаш С.А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // Машиностроение: новые концепции и технологии: Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 20 окт. 2020 г. Красноярск, 2020. С. 45–49.

Grigoreva O.I., Davtyan A.B., Grinko O.I., Voynash S.A. The Concept of a Universal Machine for Performing Forestry Work and Extinguishing Forest Fires. *Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies: All-Russian Scientific and Practical Conference for Students, Postgraduates and Young Scientists* (Krasnoyarsk, October 20, 2020). Krasnoyarsk, 2020, pp. 45–49. (In Russ.).

5. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения деревоперерабатывающих предприятий // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы 3-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 30 мая 2017 г. Петрозаводск, 2017. С. 59–61.

Grigoreva O.I., Nguyen F.Z. Forest Plantations for Raw Material Supply of Wood-Processing Enterprises. *Improving the Efficiency of the Forest Complex: Materials of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation* (Petrozavodsk, May 30, 2017). Petrozavodsk, 2017, pp. 59–61. (In Russ.).

6. Каляшов В.А., Григорьев И.В., Иванов В.А., Юдильевич А.М., Бурмистрова О.Н., Охлопкова М.К., Григорьева О.И. Особенности лесных почвогрунтов криолитозоны как объекта воздействия движителей лесных машин // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4(60). С. 94–101.

Kalyashov V.A., Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Yudilevich A.M., Burmistrova O.N., Okhlopko M.K., Grigorieva O.I. Features of Forest Soils of the Cryolithozone as an Object of Influence of Forest Machinery Movers. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2023, no. 4(60), pp. 94–101. (In Russ.).

7. Каляшов В.А., До Туан А., Хитров Е.Г., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю., Новгородов Д.В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 1–47.

Kalyashov V.A., Do Tuan A., Hitrov E.G., Grigoreva O.I., Gur'ev A.Yu., Novgorodov D.V. Modern Systems of Machinery and Technologies for Timber Harvesting and Reforestation in Mountain Forests. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 1–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6163>

8. Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. 2006. Т. X, № 3. С. 15–22.

Konstantinov P.Ya., Argunov R.N., Gerasimov E.Y., Ugarov I.S. On the Relationship between Seasonal Thaw Depth and Interannual Variation of Mean Annual Ground Temperature. *Kriosfera Zemli* = Earth's Cryosphere, 2006, vol. X, no. 3, pp. 15–22. (In Russ.).

9. Кулижский С.П. Оценка физического состояния почв на основе зависимости потенциала (давления) почвенной влаги от влажности // Современные проблемы мерзлотного почвоведения и прикладной экологии Севера: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Якутск, 29–30 марта 2012 г. Якутск: СВФУ, 2013. С. 48–63.

Kulizhskiy S.P. Assessment of the Physical Condition of Soils Based on the Dependence of Soil Moisture Potential (Pressure) on Humidity. *Current Problems of Permafrost Soil Science and Applied Ecology of the North: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (Yakutsk, March 29–30, 2012). Yakutsk, NEFU Publ., 2013, pp. 48–63. (In Russ.).

10. Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Изд.-полигр. ассоц. высш. учеб. заведений, 2019. 192 с.

Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. *Machine Harvesting of Wood Using Scandinavian Technology*. St. Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019. 192 p. (In Russ.).

11. Лейбман М.О. Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2001. Т. V, № 3. С. 17–24.

Leibman M.O. Dynamics of the Layers of Seasonal Thawing of Rocks and Methods for Measuring its Depth in Various Landscapes of Central Yamal. *Kriosfera Zemli* = Earth's Cryosphere, 2001, vol. V, no. 3, pp. 17–24. (In Russ.).

12. Никифорова А.И., Григорьева О.И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек // Актуал. направления науч. исследований XXI в.: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-4(16-4). С. 320–323.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Modeling of the Impact of the Propulsion of Forest Machines on the Soil of the Cutting Area. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual Directions of Scientific Research of the XXI century: Theory and Practice, 2015, vol. 3, no. 5-4(16-4), pp. 320–323. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/16269>

13. Никифорова А.И., Григорьева О.И., Киселев Д.С., Хахина А.М., Рудов М.Е. Оценка экологической безопасности работы лесных машин // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Междунар. науч.-практ. форума, Хабаровск, 25–26 окт. 2012 г. Хабаровск: ТГУ, 2013. С. 134–138.

Nikiforova A.I., Grigoreva O.I., Kiselev D.S., Khakhina A.M., Rudov M.E. Assessment of Environmental Safety of Forestry Machines. *Natural Resources and Ecology of the Far Eastern Region: Materials of the International Scientific and Practical Forum* (Khabarovsk, October 25–26, 2012). Khabarovsk, TSU Publ., 2013, pp. 134–138. (In Russ.).

14. Никифорова А.И., Хитров Е.Г., Пельмский А.А., Григорьева О.И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Уч. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2014. № 2(139). С. 87–91.

Nikiforova A.I., Khitrov E.G., Pelymskiy A.A., Grigor'eva O.I. Two-Layer Ground Draught Definition under Logging Machine Passage. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskkiye nauki* = Proceedings of Petrozavodsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences, 2014, no. 2(139), pp. 87–91. (In Russ.).

15. Рудов С.Е., Шати́ро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Пучнин А.Н. Особенности учета состояния массива мерзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелевочной системой // Лесотехн. журн. 2019. Т. 9, № 1(33). С. 116–128.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigor'ev M.F., Puchnin A.N. Features of Taking into Account the Condition of Frozen Soils Solid Mass in Cyclic Interaction with the Skidding System. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2019, vol. 9, no. 1(33), pp. 116–128. (In Russ.). [https://doi.org/10.12737/article\\_5c92016f49c838.40242030](https://doi.org/10.12737/article_5c92016f49c838.40242030)

16. Рудов С.Е., Шати́ро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 101–117.

Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. The Study of the Destruction Process of Frozen and Thawing Soils Exposed to the Skidding System. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 2, pp. 101–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-101-117>

17. Саввинов Д.Д. Гидротермический режим почв в зоне многолетней мерзлоты. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 254 с.

Savvinov D.D. *Hydrothermal Regime of Soils in the Permafrost Zone*. Novosibirsk, Nauka Publ. (Siberian Department), 1976. 254 p. (In Russ.).

18. Саввинов Д.Д. Фундаментальные и прикладные проблемы мерзлотного почвоведения // Современные проблемы мерзлотного почвоведения и прикладной экологии Севера: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Якутск, 29–30 марта 2012 г. Якутск: СВФУ, 2013. С. 9–17.

Savvinov D.D. Fundamental and Applied Issues of Permafrost Soil Science. *Current Problems of Permafrost Soil Science and Applied Ecology of the North: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (Yakutsk, March 29–30, 2012). Yakutsk, NEFU Publ., 2013, pp. 9–17. (In Russ.).

19. Тетеревлева Е.В., Гринько О.И., Григорьева О.И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колесных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 22 окт. 2020 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 374–377.

Teterevleva E.V., Grin'ko O.I., Grigoreva O.I. Transport and Technological Vehicles for Extinguishing Forest Fires Based on Wheeled All-Terrain Vehicles. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical*

Conference (Tyumen', October 22, 2020). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen', 2020, pp. 374–377. (In Russ.).

20. Чемишкова Ю.М., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 22 окт. 2020 г. / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень, 2020. С. 400–403.

Chemshikova Yu.M., Davtyan A.B., Grigoreva O.I. Transport and Technological Systems for Afforestation Based on Tracked All-Terrain Vehicles. *Transport and Transport-Technological Systems: Materials of the International Scientific and Technical Conference* (Tyumen', October 22, 2020). Ed.-in-chief N.S. Zakharov. Tyumen', 2020, pp. 400–403. (In Russ.).

21. Abdelbaki A.M. Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting Soil Bulk Density for U.S. Soils. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, vol. 9, iss. 4, pp. 1611–1619. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>

22. Amoozegar A., Heitman J.L., Kranz C.N. Comparison of Soil Particle Density Determined by a Gas Pycnometer Using Helium, Nitrogen, and Air. *Soil Science Society of America Journal*, 2023, vol. 87, iss. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1002/saj2.20476>

23. Gonçalves J.L.M., Alvares C.A., Rocha J.H.T., Brandani C.B., Hakamada R. Eucalypt Plantation Management in Regions with Water Stress. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 2017, vol. 79, iss. 3, pp. 169–183. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>

24. Marra E., Laschi A., Fabiano F., Foderi C., Neri F., Mastrodonardo G., Marchi E. Impacts of Wood Extraction on Soil: Assessing Rutting and Soil Compaction Caused by Skidding and Forwarding by Means of Traditional and Innovative Methods. *European Journal of Forest Research*, 2022, vol. 141, pp. 71–86. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01420-w>

25. Strandgard M., Alam M., Mitchell R. Impact of Slope on Productivity of a Self-Levelling Processor. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 35, iss. 2, pp. 193–200.

26. Zhou C., Huang W., Qiu S., Liu Z. A Quantitative Study on the Amount of Water-Retaining Agent Based on Adhesive-Modified Red Bed Weathered Soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, vol. 80, pp. 3139–3150. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02113-9>

**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\*3

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-153-165

## Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера

**К.П. Рукомойников**<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

**Т.В. Сергеева**, *аспирант*; ResearcherID: [AAY-9142-2020](https://orcid.org/0000-0002-6367-8340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

**Т.А. Гилязова**, *аспирант*; ResearcherID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

**Е.М. Царев**, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

**П.Н. Анисимов**, *канд. техн. наук, доц.*; ResearcherID: [S-2129-2016](https://orcid.org/0000-0002-7789-2399),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; RukomojnikovKP@volgatech.net<sup>✉</sup>, Sergeeva2010t@mail.ru, tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, AnisimovPN@volgatech.net

Поступила в редакцию 30.12.23 / Одобрена после рецензирования 03.03.24 / Принята к печати 05.03.24

**Аннотация.** Краткий анализ исследований, посвященных лесозаготовительной технике, позволил сделать вывод о необходимости дополнительного изучения степени влияния на производительность харвестера лесоводственно-таксационных показателей древостоя, содержащих количественную информацию о заготавливаемых и остающихся на доразивание деревьях. Степень влияния количественных показателей древостоя на работу харвестера носит случайный характер, что обусловлено бесконечно большим разнообразием вариантов пространственного расположения деревьев на пасаках. В статье представлены результаты производственного эксперимента по оценке воздействия количественных характеристик древостоя на продолжительность отдельных элементов цикла работы харвестера. В число анализируемых факторов были включены общее количество деревьев на 1 га и доля вырубаемого компонента древостоя. Данные факторы играют значительную роль в оценке сменной и часовой производительностей машин, однако при анализе продолжительности ряда элементов цикла работы манипуляторных машин важность этих показателей многими исследователями недооценена и в целях повышения удобства и простоты расчетов названные показатели не используются при обосновании трудозатрат. Оба фактора были рассмотрены на 3 уровнях варьирования. В результате доказано значимое влияние анализируемых факторов на продолжительность 3 независимых элементов цикла работы машины: наведения манипулятора на дерево, подтаскивания хлыста в зону обработки и перемещения харвестера между рабочими позициями. Эксперимент осуществлен с использованием харвестера Silvatec 8266TH в условиях его работы на пасаках с различными лесоводственными и таксационными характеристиками. Показана последовательность проведения производственного эксперимента и статистической обработки полученных данных. Дисперсионный анализ позволил сделать вывод о необходимости комплексного учета исследованных факторов при оценке каждой технологической операции. Результаты могут быть использованы для совершенствования математических зависимостей в расчетах производительности и трудозатрат при проектировании лесосечных работ.

© Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н., 2024

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

**Ключевые слова:** производственный эксперимент, харвестер, лесосечные работы, выборочная рубка, статистика, лесосека, латинский квадрат, дисперсионный анализ

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

**Для цитирования:** Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 153–165. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-153-165>

Original article

## The Influence of the Stand Composition on the Cycle Time of the Harvester

**Konstantin P. Rukomojnikov**<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

**Tat'yana V. Sergeeva**, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAY-9142-2020](https://orcid.org/0000-0002-6367-8340), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-8340>

**Tat'yana A. Gilyazova**, Postgraduate Student; ResearcherID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

**Evgeniy M. Tsarev**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

**Pavel N. Anisimov**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [S-2129-2016](https://orcid.org/0000-0002-7789-2399), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>

Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; RukomojnikovKP@volgatech.net<sup>✉</sup>, Sergeeva2010t@mail.ru, tat-gilyazova@yandex.ru, CarevEM@volgatech.net, AnisimovPN@volgatech.net

Received on December 30, 2023 / Approved after reviewing on March 3, 2024 / Accepted on March 5, 2024

**Abstract.** A brief analysis of studies on logging equipment has allowed us to conclude that it is necessary to further study the degree of influence of silvicultural and taxation indicators of the stand, containing quantitative data on the trees harvested and remaining for rearing, on the productivity of the harvester. The degree of influence of quantitative indicators of the stand on the work of the harvester is random, which is due to the infinitely wide variety of options for the spatial arrangement of trees in forest swathes. The article presents the results of a production experiment to assess the impact of the quantitative characteristics of the forest stand on the duration of individual elements of the cycle time of the harvester. The analyzed factors included the total number of trees per 1 hectare and the proportion of the felled component of the stand. These factors play a significant role in assessing the shift and hourly productivity of machines, however, when analyzing the duration of a number of elements of cycle time of manipulator machines, the importance of these indicators is underestimated by many researchers and, in order to increase the convenience and simplicity of calculations, these indicators are not used in justifying labour costs. Both factors have been considered at three levels of variation. As a result, the significant influence of the analyzed factors on the duration of 3 independent elements of cycle time of the machine (pointing the manipulator at the tree, hauling the trunk to the processing zone and moving the harvester between operating positions) has been proven. The experiment has been carried out using the Silvatec 8266TH harvester under conditions of its operation in the swathes characterized



by various silvicultural and taxation indicators. The sequence of conducting the production experiment and statistical processing of the obtained data has been shown. The analysis of variance has allowed us to conclude that it is necessary to comprehensively take into account the analyzed factors when assessing each technological operation. The results can be used to improve mathematical relationships in calculating productivity and labour costs when designing logging operations.

**Keywords:** production experiment, harvester, logging operations, selective logging, statistics, felling area, Latin square, analysis of variance

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 24-26-00129, <https://rscf.ru/project/24-26-00129/>.

**For citation:** Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. The Influence of the Stand Composition on the Cycle Time of the Harvester. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 3, pp. 153–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-153-165>

### *Введение*

Производительность харвестера зависит от большого числа таксационных и лесоводственных показателей древостоя. Многие существующие исследования по анализу воздействия таксационных и лесоводственных характеристик на эффективность работы лесозаготовительного харвестера подчеркивают важнейшую роль объемных показателей предмета труда (дерева), не акцентируя внимание на количестве деревьев на 1 га и степени изреживания древостоя в процессе рубки [3, 5–7]. В то же время движения харвестера при выборочных рубках должны осуществляться с минимальными повреждениями оставляемых на доращивание деревьев. Работа любой лесозаготовительной машины при увеличении их доли на лесосеке в значительной степени усложняется. Существует ряд теоретических исследований, подтверждающих гипотезу о негативном влиянии на производительность харвестера повышения числа остающихся на лесосеке деревьев [2, 10, 16]. Созданы имитационные модели, позволяющие провести компьютерный анализ влияния пространственного расположения деревьев на траекторию движения как харвестера, так и его манипулятора [8, 9, 18]. Однако в настоящий момент отсутствует экспериментальная производственная оценка значимости воздействия количественных показателей вырубаемых и остающихся на лесосеке деревьев на трудозатраты при выполнении отдельных элементов работы лесозаготовительного харвестера.

Цель исследования – оценка влияния количественных характеристик состава древостоя на продолжительность отдельных элементов в цикле работы харвестера.

### *Объекты и методы исследования*

Приведенный выше краткий анализ существующих исследований позволил сделать вывод о недостаточной изученности и необходимости дополнительного анализа степени влияния на производительность харвестера лесоводственно-таксационных показателей древостоя, отражающих количество заготавливаемых и остающихся на доращивание деревьев и демонстрирующих случайный характер степени влияния на работу харвестера. Случайность здесь обусловлена бесконечно большим разнообразием вариантов пространственно-

го расположения как заготавливаемых деревьев, так и деревьев, оставляемых на доращивание и являющихся препятствиями для движения манипулятора, а также разнообразием вариантов выбора мест для остановок харвестера на каждой новой рабочей позиции по отношению к деревьям. Исходя из этого, для производственного эксперимента было выделено 2 фактора: количество деревьев на гектаре  $k_d$  и доля вырубаемого компонента  $k_i$ .

На основе анализа априорных данных было выдвинуто предположение о статистической незначимости взаимодействий рассматриваемых факторов, показывающее, что общее количество деревьев на 1 га не зависит от доли вырубаемых деревьев в общем составе древостоя и наоборот. Выбран план эксперимента типа латинского квадрата с варьированием факторов на 3 уровнях –  $n = 3$  (табл. 1). Интервалы варьирования для фактора  $k_d$ :  $k_{d1} = 200$ ;  $k_{d2} = 400$ ;  $k_{d3} = 600$ ; для фактора  $k_i$ :  $k_{i1} = 0,2$ ;  $k_{i2} = 0,6$ ;  $k_{i3} = 1$ . Этот план позволяет осуществить равномерное сканирование факторного пространства и выявить значимые факторные признаки.

Таблица 1

**Представление латинского квадрата с учетом уровней варьлируемых факторов производственного эксперимента**  
**The representation of the Latin square taking into account the levels of variable factors of the production experiment**

$k_i$	$k_d$		
	$k_{d1}$	$k_{d2}$	$k_{d3}$
$k_{i1}$	$\Pi_{ч1}$	$\Pi_{ч4}$	$\Pi_{ч7}$
$k_{i2}$	$\Pi_{ч2}$	$\Pi_{ч5}$	$\Pi_{ч8}$
$k_{i3}$	$\Pi_{ч3}$	$\Pi_{ч6}$	$\Pi_{ч9}$

Примечание:  $\Pi_{ч1}$ – $\Pi_{ч9}$  – часовые производительности на пасаках 1–9, м<sup>3</sup>.

Тогда план производственного эксперимента можно представить в виде табл. 2.

Таблица 2

**План производственного эксперимента при анализе факторов, влияющих на производительность харвестера**  
**The production experiment plan for the analysis of factors affecting the harvester performance**

Номер пасаки	$k_d$	$k_i$	$\Pi_{ч}$
1	$k_{d1}$	$k_{i1}$	$\Pi_{ч1}$
2	$k_{d1}$	$k_{i2}$	$\Pi_{ч2}$
3	$k_{d1}$	$k_{i3}$	$\Pi_{ч3}$
4	$k_{d2}$	$k_{i1}$	$\Pi_{ч4}$
5	$k_{d2}$	$k_{i2}$	$\Pi_{ч5}$
6	$k_{d2}$	$k_{i3}$	$\Pi_{ч6}$
7	$k_{d3}$	$k_{i1}$	$\Pi_{ч7}$
8	$k_{d3}$	$k_{i2}$	$\Pi_{ч8}$
9	$k_{d3}$	$k_{i3}$	$\Pi_{ч9}$

В ходе эксперимента осваивались отдельные пасеки на лесосеке, отведенной для сплошной рубки леса на территории горельников в весенний период 2023 г. Породный состав древостоя – 10С. Средний запас древесины на 1 га – 240 м<sup>3</sup>. Средний объем деревьев – 0,4 м<sup>3</sup>. Крупный подлесок отсутствовал.

Осуществлялось наблюдение за работой харвестера Silvatec 8266, управляемого оператором со стажем работы более 5 лет. Ширина пасек составляла 15 м. Анализируемые участки пасек имели протяженность 100 м. В ходе экспериментальных исследований проведено 9 опытов. С целью обеспечения требуемого согласно плану эксперимента количества деревьев на участках пасек: 30 (1–3-я пасеки), 60 (4–6-я пасеки) и 90 (7–9-я пасеки) деревьев, – соответствующего среднему запасу 600, 400 и 200 дер./га, осуществлялось предварительное прореживание пасек (см. рисунок). В процессе их подготовки харвестер перемещался по технологическим коридорам по обе стороны пасек и выполнял выборочную рубку для достижения необходимого количества деревьев. После подготовки очередной пасеки харвестер начинал работу на ней, перемещаясь по пасечному волоку, проложенному посередине пасеки. В это время наблюдатель, находящийся в кабине, с помощью секундомера фиксировал трудозатраты на выполнение отдельных элементов работы.

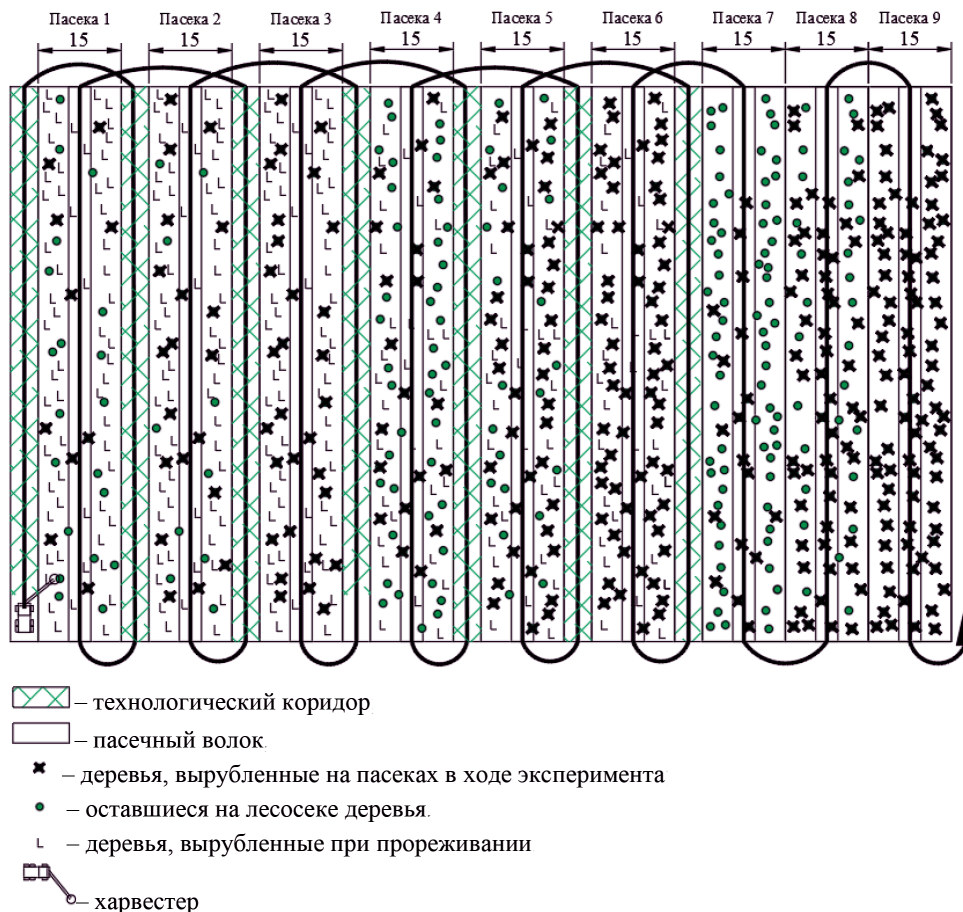


Схема реализации эксперимента (15 – ширина пасеки, м)

The scheme of the experiment implementation (15 – the width of the forest swathe, m)

Производительность определялась путем регистрирования объемных показателей заготовленных лесоматериалов на дисплее машины. При этом на пасаках 1, 4, 7 доля прореживания древостоя составляла 20 %; на пасаках 2, 5, 8 – 60 %; на пасаках 3, 6, 9 – 100 %. После разработки пасаки по всей ее длине харвестер перемещался в технологический коридор вблизи следующей пасаки и начинал ее подготовку к эксперименту.

При изучении влияния природно-производственных факторов на выходной параметр «производительность харвестера» был использован метод дисперсионного анализа, позволивший оценить существенность интересующих нас составляющих на фоне фактора случайности.

Для реализации эксперимента определены следующие фиксажные точки: продолжительность наведения манипулятора регистрировалась с момента изменения направления взгляда оператора харвестера для выбора следующего дерева после завершения предыдущей операции. Момент начала движения захватов харвестерной головки при захвате дерева считался завершением наведения манипулятора;

продолжительность перемещения поваленного дерева фиксировалась с момента отделения дерева от пня и до начала раскряжевки ствола;

начало перемещения харвестера между рабочими позициями отмечалось аналогично времени начала наведения манипулятора – с момента изменения направления взгляда оператора харвестера для выбора следующего дерева после завершения предыдущей операции. Момент остановки харвестера на новой рабочей позиции брался за время завершения операции.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Экспериментальные данные наблюдений за производительностью харвестера и результаты их предварительной обработки представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### **Результаты предварительной обработки наблюдений за производительностью харвестера**

#### **The results of pre-processing the observations of the harvester performance**

Фактор $k_i$	Фактор $k_d$			$K_i$	$K_i^2$
	$k_{d1}$	$k_{d2}$	$k_{d3}$		
$k_{i1}$	$\Pi_{ч1} = 10,9$	$\Pi_{ч4} = 13,4$	$\Pi_{ч7} = 15,4$	39,7	1576,09
$k_{i2}$	$\Pi_{ч2} = 14,1$	$\Pi_{ч5} = 15,0$	$\Pi_{ч8} = 16,2$	45,3	2052,09
$k_{i3}$	$\Pi_{ч3} = 15,2$	$\Pi_{ч6} = 15,9$	$\Pi_{ч9} = 16,6$	47,7	2275,29
$K_d$	40,2	44,3	48,2	132,7	
$K_d^2$	1616,04	1962,49	2323,24		

Дисперсионный анализ результатов выполнен по следующим формулам.

1. Подведение общего итога:

$$G = \sum_{j=1}^{n=3} K_{dj} = \sum_{k=1}^{n=3} K_{ik} = 132,7,$$

где  $j, k$  – уровни варьирования факторов  $k_d$  и  $k_i$  соответственно;  $K_{dj}, K_{ik}$  – сумма результирующих значений производительности при каждом уровне варьирования факторов  $k_d$  и  $k_i$  соответственно.

2. Определение общей суммы квадратов всех наблюдений:

$$S_o = \sum_{j=1}^{n=3} \sum_{k=1}^{n=3} \Pi_{чjk}^2 - \frac{G^2}{n^2} = 24,602.$$

3. Вычисление суммы квадратов для каждого фактора:

$$S_{k_d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n K_{dj}^2 - \frac{G^2}{n^2} = 10,669;$$

$$S_{k_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n K_{ik}^2 - \frac{G^2}{n^2} = 11,235.$$

4. Нахождение остаточной суммы квадратов:

$$S_{ост} = S_o - (S_{k_d} + S_{k_i}) = 2,698.$$

Результаты дисперсионного анализа данных представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Дисперсионный анализ влияния факторов на производительность харвестера**  
**The analysis of variance of the influence of factors on the harvester performance**

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Среднее квадратическое отклонение	Уровень значимости	Критерий Фишера	
					расчетное значение	критическое значение
$k_d$	10,669	2	5,334	0,04	7,91	6,94
$k_i$	11,236	2	5,618	0,03	8,33	6,94
$S_{ост}$	2,698	4	0,674			
<i>Итого</i>	24,602	8				

Можно сделать вывод о значимом влиянии анализируемых факторов  $k_d, k_i$ . Во всех случаях расчетный критерий Фишера превышает табличное критическое значение этого показателя  $F_{кр} = F_{1-P}(v_1, v_2, P)$ , взятого при 5%-м уровне значимости и степенях свободы числителя  $v_1 = n - 1$  и знаменателя  $v_2 = (n - 1)(n - 2)$ .

На основе результатов производственного эксперимента аналогично вышеприведенным расчетам выполнен дисперсионный анализ результатов влияния факторных признаков на продолжительность ряда элементов цикла заготовки сортиментов:

$t_{нав}$  – среднюю продолжительность анализа оператором доступности вырубаемого дерева и наведения на него манипулятора, с;

$t_{подт}$  – среднюю продолжительность подтаскивания поваленного дерева в зону его последующей обработки с корректировкой и без корректировки рабочей позиции в процессе подтаскивания, с;

$t_{\text{пер}}$  – среднюю продолжительность перемещения между рабочими позициями, с.

Результаты дисперсионного анализа сведены в табл. 5.

Таблица 5

**Представление латинских квадратов  
с учетом уровней варьируемых факторов  
и полученных значений средней продолжительности  
элементов рабочего цикла харвестера**

**The representation of the Latin squares taking into account  
the levels of variable factors and the obtained values  
of the average duration of elements of the cycle time  
of the harvester**

$k_i$	$k_d$		
	$k_{d1}$	$k_{d2}$	$k_{d3}$
$k_{i1}$	$t_{\text{нав}1} = 12,9$	$t_{\text{нав}4} = 13,3$	$t_{\text{нав}7} = 13,8$
$k_{i2}$	$t_{\text{нав}2} = 12,3$	$t_{\text{нав}5} = 12,7$	$t_{\text{нав}8} = 13,2$
$k_{i3}$	$t_{\text{нав}3} = 10,5$	$t_{\text{нав}6} = 10,8$	$t_{\text{нав}9} = 11,1$
$k_{i1}$	$t_{\text{подг}1} = 8,5$	$t_{\text{подг}4} = 9,6$	$t_{\text{подг}7} = 10,9$
$k_{i2}$	$t_{\text{подг}2} = 9,9$	$t_{\text{подг}5} = 11,2$	$t_{\text{подг}8} = 11,9$
$k_{i3}$	$t_{\text{подг}3} = 8,1$	$t_{\text{подг}6} = 9,3$	$t_{\text{подг}9} = 9,7$
$k_{i1}$	$t_{\text{пер}1} = 34,3$	$t_{\text{пер}4} = 20,1$	$t_{\text{пер}7} = 14,1$
$k_{i2}$	$t_{\text{пер}2} = 13,8$	$t_{\text{пер}5} = 6,4$	$t_{\text{пер}8} = 4,1$
$k_{i3}$	$t_{\text{пер}3} = 8,1$	$t_{\text{пер}6} = 3,7$	$t_{\text{пер}9} = 2,5$

Результаты подсчета показателей дисперсионного анализа по всем факторным признакам показаны в табл. 6.

Таблица 6

**Итоговые показатели дисперсионного анализа  
по каждому факторному признаку**

**The final indicators of the analysis  
of variance for each factor characteristic**

Фактор	$G$	$S_o$	$S_{k_d}$	$S_{k_i}$	$S_{\text{ост}}$
$t_{\text{нав}}$	110,6	11,509	10,516	0,962	0,030
$t_{\text{подг}}$	89,1	12,380	6,047	6,080	0,253
$t_{\text{пер}}$	107,1	838,580	554,587	225,167	58,827

Итоговые результаты дисперсионного анализа по каждому из анализируемых элементов цикла представлены в табл. 7.



Таблица 7

**Дисперсионный анализ результатов наблюдений за продолжительностью  
элементов цикла работы харвестера**

**The analysis of variance of the results of observations of the duration of elements  
of the cycle time of the harvester**

Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Среднее квадратическое отклонение	Уровень значимости	Критерий Фишера	
					расчетное значение	критическое значение
<i>Продолжительность наведения манипулятора</i>						
$k_d$	0,962	2	0,481	0,001	61,857	6,944
$k_i$	10,516	2	5,258	0,000	676,000	6,944
$S_{ост}$	0,031	4	0,008			
<i>Итого</i>	11,509	8				
<i>Продолжительность подтаскивания поваленного дерева</i>						
$k_d$	6,080	2	3,040	0,002	48,000	6,944
$k_i$	6,047	2	3,023	0,002	47,737	6,944
$S_{ост}$	0,253	4	0,063			
<i>Итого</i>	12,380	8				
<i>Продолжительность перемещения между рабочими позициями</i>						
$k_d$	225,167	2	112,583	0,043	7,655	6,944
$k_i$	554,587	2	277,293	0,009	18,855	6,944
$S_{ост}$	58,827	4	14,707			
<i>Итого</i>	838,580	8				

Во всех случаях расчетный критерий Фишера превышает табличный критический при 5%-м уровне значимости и степенях свободы числителя  $\nu_1$  и знаменателя  $\nu_2$ .

В научной литературе решение вопросов использования анализируемых в данной работе факторов при оценке трудозатрат имеет достаточно противоречивый характер. Все исследователи в области лесной промышленности соглашаются, что данные факторы играют роль в сменной и часовой производительностях машин, однако при анализе продолжительности ряда элементов цикла работы манипуляторных машин важность этих показателей часто недооценивается, и в целях повышения удобства и простоты расчетов они не применяются при обосновании трудозатрат. В частности, в математических моделях [1, 4, 11, 12] эти показатели использованы при оценке продолжительности перемещений харвестера, но не учитываются при характеристике продолжительности таких элементов цикла, как наведение манипулятора и подтаскивание дерева в зону обработки. Существующие российские нормы (Межотраслевые нормы выработки и времени на лесозаготовительные

работы. Утв. Постановлением Мин-ва труда Рос. Федерации от 19 дек. 1994 г. № 82) не принимают названные факторы во внимание при обосновании часовых норм выработки. Регрессионные зависимости, полученные исследователями в ходе производственных и имитационных экспериментов, также противоречивы: ряд источников [14, 16, 19] выдвигает гипотезу о значимости этих факторов, приводя доказательства для различных природных условий лесосек, а ряд [13, 15, 17], напротив, не рассматривает варианты сочетания этих факторов при выборочных рубках леса, выделяя в качестве основных факторов объемные показатели деревьев.

В то же время, анализируя экспериментальные результаты исследования продолжительности наведения манипулятора, можно отметить рост трудозатрат при снижении доли вырубаемого компонента. Это связано с тем, что остающиеся на доращивание деревья создают препятствия на пути движения манипулятора. Чем больше густота древостоя, тем сложнее оператору при выборе направления падения дерева, а следовательно, увеличивается продолжительность анализа ситуации при наведении на него манипулятора.

С повышением густоты древостоя оператору сложнее обеспечить передвижение поваленного дерева без повреждения растущих.

При увеличении доли вырубаемого компонента в ходе выборочных рубок растет процент деревьев, заготавливаемых на полупасеках, по сравнению с числом деревьев, вырубаемых на волоках. Трудозатраты на перемещение поваленных деревьев с территории полупасек с обеспечением сохранности остающихся на доращивание деревьев значительно больше, чем при перемещении деревьев, поваленных на волоке. Кроме того, при выборочных рубках необходимость обеспечения сохранности оставляемых на доращивание деревьев приводит к дополнительным перемещениям не только манипулятора, но и самой машины при подтаскивании их в зону обработки, что обуславливает рост продолжительности операции. Вследствие большого расстояния между деревьями при сплошных рубках продолжительность операции здесь меньше, чем при выборочных.

Увеличение средней продолжительности перемещения харвестера на каждую новую рабочую позицию при снижении числа вырубаемых деревьев на площади и росте расстояния между ними не вызывает сомнения. Однако в ходе эксперимента отмечено, что при выборочных рубках с целью минимизации повреждений оставляемых на доращивание деревьев при перемещении хлыстов в зону обработки оператору харвестера в ряде случаев приходится одновременно с движением манипулятора осуществлять движение харвестера по волоку в обратном направлении, что в последующем повышает расстояние, проходимое харвестером при перемещении вперед до следующей рабочей позиции, и в целом суммарные расстояния передвижений машины по лесосеке. Это показывает, что влияние на среднюю продолжительность перемещения харвестера между рабочими позициями имеет не только количество вырубаемых деревьев, но и количество деревьев, оставляемых на доращивание.

*Заключение*

В результате проведенного производственного эксперимента доказано, что продолжительность всех анализируемых элементов цикла работы харвестера: наведения манипулятора на дерево, подтаскивания хлыста в зону обработки, перемещения харвестера между рабочими позициями – напрямую зависит от факторов, характеризующих состав древостоя в условиях конкретных лесосек, таких как доля вырубемого компонента и количество деревьев на 1 га.

В анализируемом факторном пространстве значимое влияние на продолжительность перемещения машины между рабочими позициями оказывают значения обоих количественных факторных признаков. Как показало проведенное на практике исследование, необходим комплексный учет анализируемых факторов при оценке каждой технологической операции.

Результаты могут быть использованы для совершенствования математических зависимостей в расчетах производительности и трудозатрат при проектировании лесосечных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Мехренцев А.В. Сортиментная заготовка леса / науч. ред. Н.А. Луганский, Н.В. Лившиц; Урал. гос. лесотехн. акад. Екатеринбург: УГЛТА, 2001. 134 с.

Azarenok V.A., Hertz E.F., Mekhrentsev A.V. *Cut-to-Length Timber Harvesting: a Textbook for Universities*. Ural State Forest Engineering Academy. Yekaterinburg: USFEA Publ., 2001. 134 p. (In Russ.).

2. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Бальде Т.М.Д. Системный анализ технологической эффективности производства сортиментов на базе ВСРМ // Изв. СПбЛТА. 2020. № 233. С. 177–188.

Bazarov S.M., Belenkii Yu.I., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Balde T.M.D. System Analysis of the Wheel Forwarder's Technological Efficiency on the Unloading Operation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnikeskoj akademii*, 2020, no. 233, pp. 177–188 (in Russian with English summary). (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.233.177-188>

3. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Бальде Т.М.Д. Системный анализ динамики работы харвестерной головки валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (ХГ ВСРМ) // Изв. СПбЛТА. 2021. № 235. С. 150–164.

Bazarov S.M., Belenkii Yu.I., Svoikin F.V., Svoikin V.F., Balde T.M.D. System Analysis of the Dynamics of the Harvester Head of Wheel Harvester. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnikeskoj akademii*, 2021, no. 235, pp. 150–164 (in Russian with English summary). (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.150-164>

4. Григорьев И.В., Редькин А.К., Иванов В.А., Пошарников Ф.В., Шегельман И.Р., Ширнин Ю.А., Кацадзе В.А., Валяжонков В.Д., Бит Ю.А., Матросов А.В., Куницкая О.А. Технологии и машины лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2012. 362 с.

Grigor'yev I.V., Red'kin A.K., Ivanov V.A., Posharnikov F.V., Shegel'man I.R., Shirnin Yu.A., Katsadze V.A., Valyazhonkov V.D., Bit Yu.A., Matrosov A.V., Kunitskaya O.A. *Technology and Machines for Logging Operations*. Saint Petersburg, SPbSFTU named after S.M. Kirov Publ., 2012. 362 p. (In Russ.).

5. Мохирев А.П. Методика выбора лесозаготовительных машин под природно-климатические условия // Лесотехн. журн. 2016. Т. 6, № 4(24). С. 208–215.
- Mokhirev A.P. The Method of Selection of Forest Machines under the Climatic Conditions. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 208–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/23459>
6. Мохирев А.П., Куницкая О.А., Калита Г.А., Вернер Н.Н., Швецова В.В. Оценка надежности лесозаготовительного харвестера // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 5. С. 93–101.
- Mokhirev A.P., Kunitskaya O.A., Kalita G.A., Verner N.N., Shvetsova V.V. Logging Harvester Reliability Assessment. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 93–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-93-101>
7. Рукомойников К.П. Имитационное моделирование взаимосогласованной работы комплектов адаптивно-модульных лесных машин // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 154–158.
- Rukomojnikov K.P. Simulation Modeling of Mutually Coordinated Operation of Sets of Adaptive-Modular Forest Machines. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 3, pp. 154–158. (In Russ.).
8. Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Волдаев М.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевых машин // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2(54). С. 108–113.
- Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. Computer Simulation of the Development of Logging Sites Using a Felling-Delimiting Bucker. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2022, № 2(54), pp. 108–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-2-108-113>
9. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехн. журн. 2017. Т. 7, № 3(27). С. 307–314.
- Sokolov A.P., Osipov E.V. Simulation of the Production Process of Timber Harvesting with the Help of Petri Nets. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2017, vol. 7, no. 3(27), pp. 307–314. (In Russ.). [https://doi.org/10.12737/article\\_59c2140d704ae5.63513712](https://doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712)
10. Хитров Е.Г., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Пример расчета производительности харвестера с учетом природно-производственных условий // Актуальные вопросы транспорта в лесном комплексе: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 28–29 нояб. 2019 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 76–80.
- Khitrov E.G., Grigoriev G.V., Dmitrieva I.N. An Example of Calculating Harvester Productivity Taking into Account Natural Production Conditions. *Current Issues of Transport in the Forest Complex: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (St. Petersburg, November 28–29, 2019). St. Petersburg, SPbSFTU named after S.M. Kirov Publ., 2020, pp. 76–80. (In Russ.).
11. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Профи-информ, 2005. 344 с.
- Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.N. *Technical Equipment of Modern Logging*. St. Petersburg, Profi-inform Publ., 2005. 344 p. (In Russ.).
12. Ширнин Ю.А. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Ч. 1. Лесосечные работы. М.: МГУЛ, 2004. 445 с.
- Shirnin Yu.A. *Technology and Equipment of Timber Industries. Part 1. Logging Operations*. Moscow, MSUF Publ., 2004. 445 p. (In Russ.).

13. Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning Productivity and Cost for a Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 5, iss. 2, pp. 43–54. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
14. Li Y. Modeling Operational Forestry Problems in Central Appalachian Hardwood Forests. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports*, 2005, art. no. 4166. <https://doi.org/10.33915/etd.4166>
15. McNeel J.F., Rutherford D. Modelling Harvester-Forwarder System Performance in a Selection Harvest. *Journal of Forest Engineering*, 1994, vol. 6, iss. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661>
16. Mederski P.S., Bembenek M., Karaszewski Z., Łacka A., Szczepańska-Álvarez A., Rosińska M. Estimating and Modelling Harvester Productivity in Pine Stands of Different Ages, Densities and Thinning Intensities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, vol. 37, no. 1, pp. 27–36.
17. Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-Length Harvesting System. *Silva Fennica*, 2006, vol. 40, no. 2, art. no. 346. <https://doi.org/10.14214/sf.346>
18. Rukomojnikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Komisar V.P. Computer Modeling to Support Management and Organizational Decisions in the Use of a Forest Harvester. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*, 2022, vol. 12251, art. no. 122510P. <https://doi.org/10.1117/12.2631137>
19. Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of Harvester Productivity in Selective and Boom-Corridor Thinning of Young Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, iss. 1, pp. 56–73. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.628335>

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

Научная статья

УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-166-174

### Экологические особенности конвективной сушки пиломатериалов

**Ш.Г. Зарипов**<sup>1✉</sup>, *д-р техн. наук, доц., проф.*; *ResearcherID: [KBO-8803-2024](https://orcid.org/0000-0001-6483-2453)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-2453>*

**Ю.С. Пунтусова**<sup>2</sup>, *преподаватель*; *ResearcherID: [IQW-0187-2023](https://orcid.org/0009-0002-0287-7490)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0287-7490>*

<sup>1</sup>Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; zaripov\_sh@mail.ru✉

<sup>2</sup>Лесосибирский технологический техникум, ул. Просвещения, д. 34, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662548; puntusova@list.ru

*Поступила в редакцию 30.10.23 / Одобрена после рецензирования 01.02.24 / Принята к печати 04.02.24*

**Аннотация.** Сушка пиломатериалов – это обязательная технологическая операция при производстве изделий, в процессе которой древесине придается стабильность формы и размеров при эксплуатации и/или повышается биостойкость при транспортировке. Камерная сушка осуществляется при повышенных температурах, что предопределяет перевод древесины в химически активное состояние. В результате реализуется 1-й этап экстракции – выделение на поверхность доски комплекса веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях. При всем разнообразии веществ, которые накапливаются при росте в каждой древесной породе, можно выделить общие для всех, выделяемые при сушке, – фенол и формальдегид. Они относятся ко II классу опасности для человека. В специальной литературе данному вопросу уделяется неоправданно мало внимания. Проблема усложняется тем, что значительная часть производственных мощностей по сушке древесины в настоящее время располагается в городской черте. Поэтому весь спектр веществ, которые выделяются из высушиваемой древесины, концентрируется в жилом массиве, оказывая негативное влияние на человека. Цель исследования – установить степень воздействия на окружающую среду веществ, выделяемых из древесины при сушке. Приведенный в статье перечень веществ, которые выделяются при конвективной сушке из древесины лиственницы и сосны, а также данные по количеству этих веществ указывают на наличие проблемы по загрязнению окружающей среды. В России весь объем пиломатериалов для производства изделий высушивается сушильными установками, у которых отсутствуют приспособления, нейтрализующие загрязняющие вещества. Следовательно, вредные вещества, выделяющиеся из высушиваемой древесины, накапливаются как на территории деревообрабатывающих предприятий, так и в жилом массиве. Из сказанного вытекает вывод о том, что сушка пиломатериалов низкотемпературными режимами не может относиться к экологически чистым видам производств. Данная проблема требует более детального изучения, которое позволит разработать комплекс мероприятий для снижения негативного влияния конвективной сушки пиломатериалов на окружающую среду.

**Ключевые слова:** экология, химические вещества, сушка древесины, фенолы, формальдегид

*Для цитирования:* Зарипов Ш.Г., Пунтусова Ю.С. Экологические особенности конвективной сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 166–174. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-166-174>

Original article

## Environmental Features of Convective Lumber Drying

**Shakur G. Zaripov**<sup>1</sup>✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [KBO-8803-2024](https://orcid.org/0000-0001-6483-2453),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-2453>

**Yulia S. Puntusova**<sup>2</sup>, Lecturer; ResearcherID: [IQW-0187-2023](https://orcid.org/0009-0002-0287-7490),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0287-7490>

<sup>1</sup>Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Territory, 662543, Russian Federation; [zaripov\\_sh@mail.ru](mailto:zaripov_sh@mail.ru)✉

<sup>2</sup>Lesosibirsk Technological College, ul. Prosveshcheniya, 34, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Territory, 662548, Russian Federation; [puntusova@list.ru](mailto:puntusova@list.ru)

Received on October 30, 2023 / Approved after reviewing on February 1, 2024 / Accepted on February 4, 2024

**Abstract.** Lumber drying is a mandatory technological operation that gives wood the properties necessary for the production of items, during which the wood is given shape and size stability during operation and/or increases biostability during transportation. Chamber drying is carried out at elevated temperatures, which predetermines the transfer of wood to a chemically active state. As a result, the first stage of extraction is realized – the release of a complex of substances in a solid, liquid and gaseous states onto the surface of the board. With all the variety of substances that accumulate during the growth process in each tree species, phenol and formaldehyde, which are common to all, are released during drying. They belong to class II hazard to humans. In the specialized literature, this issue is given unjustifiably little attention. The problem is complicated by the fact that a significant part of the wood drying production capacity is currently located within the urban area. Therefore, the entire spectrum of substances that are released from the dried wood is concentrated in the residential area, having a negative impact on humans. The aim of the research is to determine the degree of environmental impact of substances released from wood during drying. The list of substances that are released during convective drying from larch and pine wood, as well as data on the amount of these substances, which are given in the article, indicate the presence of an environmental pollution problem. In Russia, the entire volume of lumber for the production of products is dried in drying plants that do not have devices that neutralize pollutants. Consequently, harmful substances released from dried wood accumulate both on the territory of wood processing enterprises and in residential areas. From the above, it follows that drying lumber using low-temperature conditions cannot be considered an environmentally friendly type of production. This problem requires a more detailed study, which will allow us to develop a set of measures to reduce the negative impact of convective lumber drying on the environment.

**Keywords:** ecology, chemical substances, wood drying, phenols, formaldehyde

**For citation:** Zaripov Sh.G., Puntusova Yu.S. Environmental Features of Convective Lumber Drying. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 3, pp. 166–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-166-174>

### *Введение*

Сушка древесины – это неотъемлемая часть технологического процесса при производстве изделия из дерева [12]. Практика обезвоживания древесины указала на то, что конвективная сушка существенно влияет на окружающую среду, как непосредственно, так и опосредованно. Под непосредственным воздействием следует понимать экстракцию веществ различного вида, негативно влияющих на окружающую среду. К указанной группе веществ относятся фенол и формальдегид [3, 5]. Опосредованное воздействие выражается в выделении тепловой энергии при сжигании отходов основного производства древесины. Каждый вид воздействия является важным и требует изучения.

Если на процесс сжигания древесины как источника тепловой энергии обращается пристальное внимание с позиции экологического воздействия на окружающую среду [8], то влияние сушки исследовано недостаточно. До настоящего времени этот процесс представлялся экологически безопасным, т. к. считалось, что при сушке из древесины выделяются только влага и воздух [3, 12]. Однако с обезвоживанием древесины в атмосферу попадает большой объем парогазовой смеси, химический состав которой необходимо изучать на предмет воздействия на окружающую среду. Проведенные научные изыскания в этой области указывают на более широкий спектр веществ, выделяющихся при сушке [3, 7, 9, 10, 15], чем это общепризнано. Причем процесс выделения веществ отличается как по их разнообразию, так и по массе в зависимости от породы древесины и режимов сушки. Поэтому каждое деревообрабатывающее предприятие является источником веществ, которые могут оказывать воздействие на окружающую среду [4, 6, 11, 13, 18, 19]. Все это говорит о важности изучения вопроса выбросов деревоперерабатывающих предприятий, деятельность которых связана с сушкой древесины.

Цель – установить степень воздействия на окружающую среду веществ, выделяющихся из древесины при сушке.

### *Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования выступали пиломатериалы древесины лиственницы и сосны. Опытные сушки позволили установить факт выделения экстрактивных веществ из древесины лиственницы и сосны путем вытеснения парогазовой смесью, которая образуется в пиломатериалах при нагреве.

Определение содержания химических соединений в конденсате парогазовой смеси осуществлялось по стандартным методикам, включая ГОСТ Р 55227–2012, в лаборатории очистных сооружений промышленного предприятия.

Анализ проведенных опытных сушек лиственничных и сосновых пиломатериалов позволил сформулировать основные положения закономерности вытеснения экстрактивных веществ, которые легли в основу работы [3].

### *Результаты исследования и их обсуждение*

*Качественная оценка веществ, выделяемых из древесины при сушке.* Данный вопрос очень многогранен. Древесные породы различаются по элементному составу незначительно. Они в среднем содержат 50 % углерода,



43 % кислорода и 6 % водорода. Остальная часть – азот, входящий в состав белков (0,1...0,3 %), и неорганические элементы, образующие при сжигании золу [14, 16].

В процессе роста дерева перечисленные химические элементы формируют различные соединения. Так, экстрактивные вещества древесины хвойных пород представлены в виде терпенов и терпеноидов, жиров, восков и их составляющих, фенольных соединений и др. В лиственных породах присутствуют терпены и терпеноиды, жиры и воски, а также их составляющие – фенолы, лигнаны, хиноны, таниды, флавоноиды и другие соединения [20].

В работе [2], посвященной изучению технологии конвективной сушки лиственных пиломатериалов, сделан вывод о том, что конвективная сушка является одной из разновидностей экстракции. Для такого утверждения есть все основания. Первое, на что было обращено внимание, это аналогичность режимов процессов экстракции и сушки. Даже при незначительном увеличении температуры сушки наблюдается повышение массы выделяемых из древесины лиственницы веществ. Вторым важным фактом – это физическое состояние веществ, которые выделяются из высушиваемой древесины: твердое, жидкое и газообразное [1, 3]. Под воздействием парогазовой смеси на поверхность древесины вытесняется водный раствор экстрактивных веществ [17]. В начальный, интенсивный период сушки водный раствор делится на 3 составляющие. Для лиственницы характерно наличие парогазовой смеси, химический состав которой определялся методом ИК-спектроскопии, после сушки при температуре 84 °С. Более подробные данные приведены в работе [3].

Всего в парогазовой смеси было установлено порядка 139 структурных единиц, включая воду в газообразном и жидком состояниях. В последней содержатся соединения, перечисленные в работе [3]. После удаления газообразной и жидкой составляющих на поверхности остается твердая часть экстрактивных веществ. При сушке лиственницы твердая часть формируется из водорастворимых веществ: арабиногалактана и дигидрокверцетина [3, 20].

Подобные результаты были получены и при сушке пиломатериалов таких лиственных пород, как дуб и бук. При анализе отработанного агента сушки были обнаружены фурфурол и формальдегид [7, 11, 19, 20].

Приведенный материал указывает на то, что при сушке наблюдается вытеснение экстрактивных веществ [3]. Данный процесс происходит независимо от способа сушки и применяемых режимов. Они лишь позволяют корректировать интенсивность процессов, т. е. количество веществ, которое выводится из древесины за единицу времени. При этом для каждой породы древесины свойственен свой спектр синтезируемых в процессе роста веществ [3].

Для оценки экологической нагрузки на окружающую среду при конвективной сушке целесообразно дать характеристику основным компонентам водного раствора экстрактивных веществ для 2 достаточно распространенных пород древесины: лиственницы [3] и сосны (табл. 1).

Таблица 1

**Характеристика конденсата, полученного при сушке древесины сосны**  
**The characteristics of the condensate obtained**  
**from drying pine wood**

Показатель	Температура сушки, °С	
	45,0	51,8
Формальдегид*, мг/дм <sup>3</sup>	0,56	0,60
Фенолы*, мг/дм <sup>3</sup>	0,135	0,200
Хлорид-ион, мг/дм <sup>3</sup>	8,5	8,6
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	1,3	1,4
Нитрит-ион, мг/дм <sup>3</sup>	0,03	<0,01
Аммоний-ион, мг/дм <sup>3</sup> *	12	31
Химическое потребление кислорода, мг/дм <sup>3</sup>	777,6	466,6
Нитрат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	0,540	1,076
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	9	1
рН	5	5
Общий азот, мг/дм <sup>3</sup>	9,43	24,30

\*Получено с учетом разбавления пробы.

Представленные в табл. 1 и работе [3] соединения условно можно разделить на 3 группы: сильно загрязняющие, умеренно загрязняющие и безвредные. К сильно загрязняющей группе относятся формальдегид, фенол, ион аммония, а также химическое потребление кислорода. Группу умеренно загрязняющих формируют нитрит-ион, нитрат-ион и сульфаты. В группу веществ, не оказывающих вредного воздействия, входят хлориды [2, 3].

*Количественная оценка веществ, выделяемых из древесины при сушке.* Ввиду того, что сушка древесины в подавляющем большинстве случаев проводится при температуре >30 °С, целесообразно рассмотреть количественную сторону вопроса при указанных условиях.

Определенное деревообрабатывающее предприятие имеет производственную мощность по объему перерабатываемой древесины. Для расчета общей массы сильных загрязнителей, которые выделяются из древесины таких пород, как сосна и лиственница, воспользуемся данными табл. 1, 2. При сушке из 1 м<sup>3</sup> древесины выводится порядка 200...250 л воды. Тогда масса веществ группы сильных загрязнителей, которые выделяются из древесины объемом 1 м<sup>3</sup>, составит в 200...250 раз больше (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристика конденсата, полученного за один цикл сушки  
древесины сосны и лиственницы**

**The characteristics of the condensate obtained  
during one cycle of pine and larch wood drying**

Показатель	Температура сушки, °С	
	45	51,8
	(для сосны )	(для лиственницы)
Формальдегид, мг/дм <sup>3</sup>	112	24
Фенолы, мг/дм <sup>3</sup>	27	12
Хлорид-ион, мг/дм <sup>3</sup>	1700	400
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	260	2000
Нитрит-ион, мг/дм <sup>3</sup>	6	6
Аммоний-ион, мг/дм <sup>3</sup>	2400	1800
Химическое потребление кислорода, мг/дм <sup>3</sup>	155 520	22 000
Нитрат-ион, мг/дм <sup>3</sup>	108	0
pH	5,0	4,8

Из табл. 2 следует вывод о том, что выделяемая масса высокотоксичных веществ способна создавать концентрации, которые превышают предельно допустимые. Это связано с конструктивной особенностью сушильных камер. В подавляющем большинстве сушильные установки для пиломатериалов оснащены приточно-вытяжными каналами, высота которых над уровнем пола сушильной камеры не превышает 6...8 м. При этом приточно-вытяжные каналы не имеют фильтров.

Следовательно, создаются условия накопления в значительных количествах высокотоксичных веществ как непосредственно на территории цеха сушки и пакетирования, так и на предприятии не ниже II класса опасности.

*Выводы*

1. Конвективная сушка пиломатериалов сопровождается выделением разнообразных химических веществ, включая фенол, формальдегид, нитриты, аммоний-ион и другие, концентрация которых во многом зависит от породы высушиваемой древесины, режимов сушки и производственной мощности сушильного цеха. Поэтому один из основных вопросов, который требует решения, это место размещения деревообрабатывающих предприятий, в технологический процесс которых входит конвективная сушка.

2. Внушительное количество выделяемых из древесины при сушке высокотоксичных веществ определяет необходимость разработки мероприятий по сбору и утилизации этих веществ.

3. Конвективную технологию сушки пиломатериалов следует отнести к группе технологий не ниже II класса опасности для человека.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Голицын В.П., Голицына Н.В. Сравнительная оценка энергозатрат на сушку пиломатериала в сушильном оборудовании различного типа и способа сушки // Лесн. эксперт. 2004. № 16. С. 18–25.

Golitsyn V.P., Golitsyna N.V. Comparative Assessment of Energy Consumption for Drying Lumber in the Equipment of Various Types and Methods of Drying. *Lesnoy ekspert*, 2004, no. 16, pp. 18–25. (In Russ.).

2. Дубина А.В., Марицель В.Н. Фотокаталитическая очистка сточных вод от формальдегида // Тр. БГТУ. Химия, технология орган. веществ и биотехнология. 2015. № 4(177). С. 283–287.

Dubina A.V., Martsul V.N. Photocatalytic Wastewater Treatment from Formaldehyde. *Trudy BGTU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya* = Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology, 2015, no. 4(177), pp. 283–287. (In Russ.).

3. Зарипов Ш.Г. Совершенствование технологии сушки лиственничных пиломатериалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. 243 с.

Zaripov Sh.G. *Improving the Technology of Larch Lumber Drying*: Doc. Eng. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2016. 243 p. (In Russ.).

4. Зарипов Ш.Г., Корниенко В.А. Гидролиз при конвективной сушке лиственничных пиломатериалов низкотемпературными режимами // Хвойные бореал. зоны. 2018. Т. XXXVI, № 6. С. 542–547.

Zaripov Sh.G., Korniyenko V.A. Hydrolysis of Larch Lumber under Low-Temperature Modes During Convective Drying. *Khvoynye boreal'noi zony* = Conifers of the Boreal Area, 2018, vol. XXXVI, no. 6, pp. 542–547. (In Russ.).

5. Михайлова Ю.С. Оценка содержания фурфурола в отработанном агенте сушки после предварительной термохимической обработки древесины бука и дуба // Лесотехн. журн. 2011. № 3. С. 24–27.

Mikhaylova Yu.S. Estimation of Furfural Content in Spent Drying Agent after Preliminary Thermochemical Processing of Beech and Oak Wood. *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2011, no. 3, pp. 24–27. (In Russ.).

6. Михайлова Ю.С. Влияние тепла и влаги на выделение фурфурола и формальдегида из древесины бука и дуба // Науч. журн. КубГАУ. 2011. № 73(09). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/07.pdf> (дата обращения: 18.04.24).

Mikhaylova Yu.S. Influence of Heat and Moisture on the Isolation of Furfural and Formaldehyde from Beech and Oak Wood. *Nauchnyj zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU, 2011, no. 73(09), art. no. 0731109007. (In Russ.).

7. Михайлова Ю.С., Платонов А.Д. Исследование воздействия фурфурола и формальдегида на окружающую среду при сушке древесины бука и дуба // Науч. журн. КубГАУ. 2011. № 70(06). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/06/pdf/21.pdf> (дата обращения: 18.04.24).

Mikhaylova Yu.S., Platonov A.D. Investigation of Furfural and Formaldehyde Influence on Environment during Drying of Beech and Oak Wood. *Nauchnyj zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2011, no. 70(06), art. no. 0701106021. (In Russ.).

8. *Нуштаева А.В.* Химия древесины. Пенза: ПГУАС, 2013. 100 с.

Nushtaeva A.V. *Chemistry of Wood*. Penza, Penza State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2013. 100 p. (In Russ.).

9. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 334 с.

Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. *Ecology and Biosphere Protection under Chemical Pollution*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 334 p. (In Russ.).

10. *Платонов А.Д.* Влияние режимных параметров процесса сушки на количество вредных веществ, выделяемых из древесины лиственных пород // Науч. журн. КубГАУ. 2012. № 76(02). Режим доступа: <http://ej.lgb.ru/2012/02/pdf/26.pdf> (дата обращения: 18.04.24).

Platonov A.D. Effect of Mode Parameters of Drying Process on the Amount of Harmful Substances Extracted from Hardwood. *Nauchnyj zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2012, no. 76(02), art. no. 0761202026. (In Russ.).

11. *Платонов А.Д., Михайлова Ю.С.* Оценка воздействия отработанного агента сушки на окружающую среду при сушке древесины бука и дуба // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 5. С. 133–134.

Platonov A.D., Mikhaylova Yu.S. Exposure Assessment of the Used Drying Agent on the Environment during Drying of Beech Wood and Oak. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2011, no. 5, pp. 133-134. (In Russ.).

12. *Платонов А.Д., Михайлова Ю.С., Снегирева С.Н., Киселева А.В., Мозговой Н.В.* Определение минимальной высоты источника выбросов из камеры при сушке древесины бука // Лесотехн. журн. 2019. № 4. С. 117–125.

Platonov A.D., Mikhailova Yu.S., Snegireva S.N., Kiseleva A.V., Mozgovoy N.V. Determining the Minimum Height of the Emission Source from Camera for Drying Beech Wood. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2019, no. 4, pp. 117–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/13>

13. *Расев А.И.* Сушка древесины. М.: Высш. шк., 1980. 181 с.

Rasev A.I. *Wood Drying*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 181 p. (In Russ.).

14. *Руденко Б.Д.* Характеристика выбросов сушильных камер при сушке древесины // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: сб. науч. тр. по итогам IV Междунар. науч.-техн. конф. / БГИТА. Вып. 4. Брянск, 2004. С. 160–163.

Rudenko B.D. Characteristics of Emissions from Drying Chambers when Drying Wood. *Forest Complex: Condition and Development Prospects: Collection of Scientific Papers from the IV International Scientific and Technical Conference*. Bryansk, Bryansk State Technological Academy of Engineering Publ., 2004, iss. 4, pp. 160–163. (In Russ.).

15. *Смирнова А.И., Антонова В.С.* Прикладная химия природных соединений. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. 94 с.

Smirnova A.I., Antonova V.S. *Applied Chemistry of Natural Compounds*. St. Petersburg: Higher School of Technology and Energy of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design Publ., 2020. 94 p. (In Russ.).

16. *Таранцева К.Р., Марьнова М.А., Андреев С.Ю.* Технология обезвреживания формальдегидосодержащих промышленных стоков // Изв. ПГПУ им. В.Г. Белинского. 2011. № 26. С. 671–676.

Tarantseva K.R., Marynova M.A., Andreev S.Yu. Technology for Neutralization of Formaldehyde-Containing Industrial Wastewater. *Izvestiya PGPU im. V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 671–676. (In Russ.).

17. Barrer R.M., Chio H.T. Solution and Diffusion of Gases and Vapors in Silicone Rubber Membranes. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1965, vol. 10, iss. 1, pp. 111–138. <https://doi.org/10.1002/polc.5070100111>

18. Hong Q., Sun D.-Z., Chi G.-Q. Formaldehyde Degradation by UV/TiO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> Process Using Continuous Flow Mode. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, vol. 19, no. 9, pp. 1136–1140. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60185-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60185-5)

19. Salman M. Removal of Formaldehyde from Aqueous Solution by Adsorption on Kaolin and Bentonite: a Comparative Study. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 263–270.


20. Timman H.D. *Wood Technology*. Chicago, 1944. 296 p.

**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 676.084.2:66.095.82

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-175-187

### Нитрозирование лигносульфонатов в условиях твердофазного катализа

Ю.Г. Хабаров<sup>✉</sup>, д-р хим. наук, проф.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

В.А. Вешняков, канд. хим. наук; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

В.А. Плахин, канд. хим. наук; ResearcherID: [AAH-6544-2020](https://orcid.org/0000-0001-9143-1663),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9143-1663>

Е.А. Скрипников, аспирант; ResearcherID: [AFB-6325-2022](https://orcid.org/0009-0007-8028-4056),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8028-4056>

Д.В. Овчинников, канд. хим. наук; ResearcherID: [B-7162-2018](https://orcid.org/0000-0001-9313-2448),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-2448>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; [khabarov.yu@mail.ru](mailto:khabarov.yu@mail.ru)<sup>✉</sup>,  
[v.a.veshnyakov@narfu.ru](mailto:v.a.veshnyakov@narfu.ru), [d.ovchinnikov@narfu.ru](mailto:d.ovchinnikov@narfu.ru)

Поступила в редакцию 24.02.24 / Одобрена после рецензирования 10.04.24 / Принята к печати 12.04.24

**Аннотация.** Лигносульфонаты являются самым распространенным коммерческим продуктом на основе лигнина благодаря своим уникальным свойствам. Известны различные способы модификации лигносульфонатов и лигносульфоновых кислот. В настоящей статье представлены результаты разработки нового подхода к получению нитрозированных лигносульфоновых кислот. Метод основан на проведении реакции, катализируемой катионообменными смолами в Н-форме: катионит КУ-2-8 и вофатит. Изучено влияние расхода реагентов и продолжительности реакции на протекание нитрозирования. Динамика предложенного нитрозирования практически совпадает с динамикой аналогичной реакции по известному методу с использованием серной кислоты. Оптимальный расход нитрита натрия составляет 15 %, а катионита – 100 % от массы лигносульфонатов. При нитрозировании лигносульфонатов происходят значительные изменения электронных спектров в области 280...500 нм. Появляются 2 перекрывающихся полосы поглощения с максимумами при 300 и 330 нм, а также интенсивная полоса поглощения при 430 нм, обусловленная нитрозогруппами, сопряженными с ароматическими ядрами фенилпропановых единиц. Для анализа спектров ионизации была проведена их деконволюция. Полученные спектры хорошо аппроксимируются 5 гауссианами с погрешностью не более 5 %. Предложено два варианта проведения реакции нитрозирования лигносульфонатов: в статических и динамических условиях. Установлено, что в динамических условиях образуются нитрозопроизводные лигно-

сульфоновых кислот, не содержащие катионов металлов, а pH полученных растворов не превышает 1,4. Определен элементный состав выделенных исходных и нитрозированных лигносульфоновых кислот. Содержание азота в лигносульфоновых кислотах увеличилось с 0,32 (исходные) до 2,17 % (нитрозированные). Кроме того, в динамических условиях не требуется дополнительная стадия отделения катионита из реакционной среды с помощью фильтрования. На ИК-спектре нитрозированных лигносульфоновых кислот появились новые полосы: при 1540 см<sup>-1</sup>, обусловленная присутствием нитрогрупп, и широкая полоса поглощения при 1700...1715 см<sup>-1</sup>, которая может быть вызвана колебаниями карбоксильной группы или хинонмонооксимной таутомерной формы в гваяцильных структурах лигносульфоновых кислот.

**Ключевые слова:** лигнин, лигносульфонаты, лигносульфоновые кислоты, модификация, нитрозирование, твердофазный катализ, спектрофотометрия, нитрозолигносульфоновые кислоты

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0010. При выполнении исследования было использовано оборудование ЦКП НО «Арктика» САФУ им. М.В. Ломоносова.

**Для цитирования:** Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Плахин В.А., Скрипников Е.А., Овчинников Д.В. Нитрозирование лигносульфонатов в условиях твердофазного катализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 175–187. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-175-187>

Original article

## Nitrosation of Lignosulfonates under Solid-Phase Catalysis Conditions

**Yuriy G. Khabarov**<sup>✉</sup>, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

**Viacheslav A. Veshnyakov**, Candidate of Chemistry; ResearcherID: [E-3882-2017](https://orcid.org/0000-0002-8278-5053),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8278-5053>

**Vadim A. Plakhin**, Candidate of Chemistry; ResearcherID: [AAH-6544-2020](https://orcid.org/0000-0001-9143-1663),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9143-1663>

**Evgeniy A. Skripnikov**, Postgraduate Student; ResearcherID: [AFB-6325-2022](https://orcid.org/0009-0007-8028-4056),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8028-4056>

**Denis V. Ovchinnikov**, Candidate of Chemistry; ResearcherID: [B-7162-2018](https://orcid.org/0000-0001-9313-2448),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-2448>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [khabarov.yu@mail.ru](mailto:khabarov.yu@mail.ru)<sup>✉</sup>, [v.a.veshnyakov@narfu.ru](mailto:v.a.veshnyakov@narfu.ru), [d.ovchinnikov@narfu.ru](mailto:d.ovchinnikov@narfu.ru)

Received on February 24, 2024 / Approved after reviewing on April 10, 2024 / Accepted on April 12, 2024

**Abstract.** Lignosulfonates are the most common commercial lignin-based product due to their unique properties. Various methods are known for modifying lignosulfonates and lignosulfonic acids. This article presents the results of the development of a new approach to the production of nitrosated lignosulfonic acids. The method is based on a reaction catalyzed by cation exchange resins in the H-form: KU-2-8 cation exchanger and wofatite. The





influence of reagent consumption and reaction duration on the course of nitrosation has been studied. The dynamics of the proposed nitrosation practically coincides with the dynamics of a similar reaction using sulfuric acid by the known method. The optimal consumption of sodium nitrite equals 15 %, and the optimal consumption of cation exchanger equals 100 % by weight of lignosulfonates. During the nitrosation of lignosulfonates, significant changes in the electronic spectra occur in the region of 280...500 nm. Two overlapping absorption bands appear with maxima at 300 and 330 nm, as well as an intense absorption band at 430 nm, due to nitroso groups conjugated with the aromatic nuclei of phenylpropane units. To analyze the ionization spectra, they have been deconvoluted. The resulting spectra are well approximated by 5 Gaussians with an error of no more than 5 %. Two options for carrying out the nitrosation reaction of lignosulfonates have been proposed: under static and dynamic conditions. It has been established that under dynamic conditions, nitroso derivatives of lignosulfonic acids are formed that do not contain metal cations, and the pH of the resulting solutions does not exceed 1.4. The elemental compositions of the isolated initial and nitrosated lignosulfonic acids have been determined. The nitrogen content of lignosulfonic acids has increased from 0.32 (initial) to 2.17 % (nitrosated). In addition, under dynamic conditions, an additional stage of separating the cation exchanger from the reaction medium by filtration is not required. New bands have appeared in the IR spectrum of nitrosated lignosulfonic acids: at 1540  $\text{cm}^{-1}$ , which is due to the presence of nitroso groups, and a wide absorption band at 1700...1715  $\text{cm}^{-1}$ , which can be caused by vibrations of the carboxyl group or the quinone monooxime tautomeric form of the guaiacyl structures of lignosulfonic acids.

**Keywords:** lignin, lignosulfonates, lignosulfonic acids, modification, nitrosation, solid-phase catalysis, spectrophotometry, nitrosolignosulfonic acids

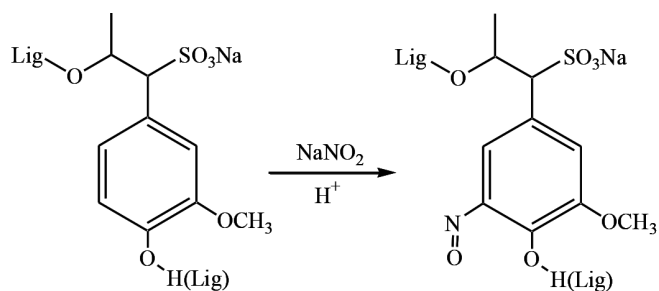
**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSRU-2024-0010. The equipment of the Center for Collective Use of Scientific Equipment "Arktika" (NArFU named after M.V. Lomonosov) was used in the research.

**For citation:** Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Plakhin V.A., Skripnikov. E.A., Ovchinnikov D.V. Nitrosation of Lignosulfonates under Solid-Phase Catalysis Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 175–187. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-175-187>

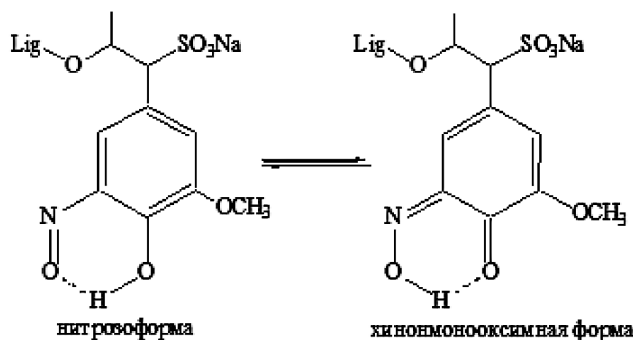
### *Введение*

Технические лигнины представляют собой производные нативных лигнинов, которые образуются при химической или биохимической переработке растительного сырья [10]. Ежегодно на целлюлозно-бумажных предприятиях образуется порядка 70 млн т лигнина [12, 15], 98 % которого сжигается для выработки технологического пара, энергии и в системе регенерации химикатов [11]. На мировом рынке 93 % коммерчески доступных технических лигнинов (1,5 млн т/год) представлены лигносульфонатами (ЛСТ) [11, 17, 21].

ЛСТ, в отличие от всех других видов лигнина, хорошо растворимы в водной среде в широком диапазоне pH. С помощью методов модификации можно значительно изменить физические и химические свойства лигнинов, тем самым расширив возможности для их практического применения [14]. Одним из легко реализуемых методов модификации является реакция электрофильного нитрозирования, в результате которой в ароматических ядрах макромолекул лигнина появляются электроноакцепторные нитрозогруппы:



Нитрозирование повышает полярность и поверхностную активность макромолекул лигносульфоновых кислот (ЛСК). Нитрозогруппы способны к реакциям как окисления, так и восстановления [8, 9], т. е. нитрозированные ЛСК приобретают свойства редоксита. Для нитрозофенолов известно явление таутомерии, в ходе которой устанавливается равновесие между нитрозо- и хинонмонооксимной формами [20]. У гваяцильных фрагментов нитрозированных ЛСТ должна проявляться нитрозо-хинонмонооксимная таутомерия:



Нитрозирование может быть проведено различными реагентами: азотистой кислотой, оксидами азота, нитрозилхлоридом, органическими нитритами [18] и *трет*-бутилнитритом [16]. Азотистая кислота легко генерируется при подкислении растворов нитритов кислотами. При этом она является неустойчивым соединением, которое существует только в разбавленном водном растворе или газовой фазе [13]. При нитрозировании ЛСК происходит реакция электрофильного замещения атомов водорода бензольного ядра фенолпропановых единиц на нитрозогруппу. Фенольная OH-группа обладает сильными электронодонорными свойствами и поэтому ориентирует реакцию нитрозирования так, что нитрозогруппа замещает атом водорода в *орто*-положении к ней [5].

Часто нитрозирование ЛСТ проводят по методу Пирла–Бенсона в течение 15 мин при комнатной температуре. Азотистая кислота образуется из нитрита натрия после добавления уксусной кислоты [19]. В присутствии азотной кислоты нитрозирование ЛСК осуществляют 1 мин [7].

Нитрозирование лигнинов применяется для решения ряда задач в химии древесины. Нитриты, например, можно использовать при отбелке целлюлозы [2] и для синтеза комплексонов биогенных металлов [6].

Реакция нитрозирования бумажной композиции при 60 °С в течение 30 мин и расходе нитрита натрия 6 % применима для определения древесной массы в составе бумажных композиций [3].

Особенностью реакции нитрозирования нитритами является то, что продукт будет содержать катионы металлов. Для получения чистых нитрозированных ЛСК требуется дополнительная стадия удаления катионов.

Цель исследования – разработка одноступенчатого метода синтеза нитрозированных ЛСК.

#### *Объекты и методы исследования*

*Реактивы и материалы.* При выполнении исследования использованы реактивы квалификации ч.д.а.:  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (96 %),  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30 %); катиониты в Н-форме: КУ-2-8 и вофатит; технические ЛСТ натрия марки Т от сульфитной варки еловой древесины (ТУ 13-0281036-029-94) Архангельского целлюлозно-бумажного комбината. Молекулярно-массовые характеристики определены методом эксклюзионной хроматографии с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии системы LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония) со спектрофотометрическим детектором SPD-20А. Длина волны – 275 нм, подвижная фаза и растворитель пробы – 0,05 М раствор  $\text{NaOH}$ . Разделение проводили при 40 °С на колонках для анализа водорастворимых полимеров МСХ 300 × 8 мм с размером пор 1000 и 100 000 Å (PSS, Германия). Градуировка системы выполнена на стандартных монодисперсных образцах полистиролсульфоната натрия в диапазоне масс от 890 до 65 400 Да (PSS, Германия). Средняя молекулярная масса использованных ЛСТ составила 9800 Да, коэффициент полидисперсности – 2,77. Элементный состав (%): Na (5,0), С (46,8), Н (5,6), N (0,7), S (0,7), редуцирующие вещества – 5,0 %.

*Методика подготовки и регенерации катионообменной смолы.* Катионообменную смолу КУ-2-8 подготавливали и регенерировали по ГОСТ 20298-74 «Смолы ионообменные. Катиониты. Технические условия».

*Методика нитрозирования ЛСТ в статических условиях.* Нитрозирование ЛСТ проводили при комнатной температуре. В колбу вносили 50 мл раствора ЛСТ и заданную навеску  $\text{NaNO}_2$ , после растворения добавляли заданную навеску катионообменной смолы КУ-2-8 или вофатита. Реакцию осуществляли при постоянном перемешивании на виброустановке. Через заданные промежутки времени отбирали 1 мл реакционной смеси и переносили в мерную колбу вместимостью 25 мл с 2 мл 1 М раствора  $\text{NaOH}$ . Объем раствора доводили до метки дистиллированной водой. Полученные растворы фотометрировали.

*Методика нитрозирования ЛСТ в динамических условиях.* Нитрозирование ЛСТ осуществляли при комнатной температуре в стеклянной колонке, диаметром 17 мм и высотой 250 мм. В колонку вносили 14,7 г катионита КУ-2-8. В 50 мл раствора ЛСТ растворяли заданную навеску нитрита натрия, после чего реакционную смесь подавали в колонку с катионитом с помощью капельной воронки с постоянной скоростью. Выходящую из колонки реакционную смесь собирали в пробирки порциями по 10 мл. Затем регистрировали рН растворов, записывали электронные спектры ионизации. Отбирали 8 мл каждого раствора в чашки Петри, испаряли их на воздухе без нагревания и высушивали до постоянной массы в вакуум-эксикаторе при комнатной температуре. У высушенных образцов записывали ИК-спектры.

*Методика регистрации электронных спектров.* Спектры регистрировали на спектрофотометре UV-1650PC (Shimadzu, Япония) в диапазоне длин волн 230...550 нм относительно дистиллированной воды, используя кварцевые кюветы с толщиной рабочего слоя 10 мм.

Перед записью электронных спектров продуктов реакции готовили исходный раствор, для чего в мерную колбу вместимостью 25 мл вносили 1 мл реакционной смеси, 2 мл 1 М раствора NaOH и доводили объем раствора до 25 мл дистиллированной водой.

Для приготовления щелочного раствора в мерную колбу вместимостью 25 мл вносили 2 мл исходного раствора, 2,5 мл 1 М раствора NaOH и доводили объем раствора до 25 мл дистиллированной водой. При приготовлении кислого раствора вместо раствора NaOH использовали 2,5 мл 10%-го раствора  $H_2SO_4$ . Спектры ионизации получали вычитанием спектра кислого раствора из спектра щелочного раствора. Деконволюцию спектров ионизации на индивидуальные полосы поглощения проводили с использованием MS Excel, для удобства построения симметричных гауссиан использовали ось абсцисс, выраженную в волновых числах.

*Методика измерения оптической плотности.* Измерение проводили на фотометре «Эксперт-003» (Россия) при длине волны 430 нм относительно дистиллированной воды в кювете с толщиной рабочего слоя 10 мм.

*Методика регистрации ИК-спектров.* ИК-спектры записывали в диапазоне волновых чисел 4000...390  $cm^{-1}$  на ИК-Фурье-спектрофотометре FTIR-8400 S (Shimadzu, Япония) с помощью НПВО-приставки MIRacle (PIKE Technologies, США).

*Методика измерения pH.* Измерение выполняли с помощью pH-метра HI 2211-02 (Hanna Instruments, Германия) со стеклянным электродом. Предварительно прибор был откалиброван по двум буферным растворам с pH 6,86 и 4,01.

*Методика определения катионного состава.* Предварительно проводили мокрое озонение. Для этого навеску ЛСТ или нитрозированных ЛСК (10...15 мг) помещали в длинную пробирку из термостойкого стекла, добавляли 1 мл концентрированной серной кислоты и 0,5 мл раствора  $H_2O_2$ . Пробирку нагревали на электроплитке до обесцвечивания раствора. Если содержимое пробирки оставалось желтоватым, то добавляли по каплям новые порции раствора 30%-го  $H_2O_2$ . После завершения озонения (полное обесцвечивание) пробирку охлаждали и объем раствора доводили дистиллированной водой до 25 мл.

Катионный состав растворов после мокрого озонения определяли с помощью ионной хроматографии с использованием ионнохроматографической системы ICS-5000 (Dionex, США).

*Методика определения элементного состава.* Элементный анализ проводили на CHNS-O-анализаторе EuroEA-3000 (EuroVector, Италия).

### *Результаты исследования и их обсуждение*

*Нитрозирование ЛСТ с использованием катионита.* Проведение нитроирования ЛСТ с использованием минеральных кислот не позволяет получить чистые нитрозированные ЛСК, т. к. в реакционной среде кроме нитрозоЛСТ будут находиться катионы металлов, источниками которых являются ЛСТ и соль азотистой кислоты. Поэтому требуется дополнительная стадия – декатионирование.

Для того чтобы реализовать 1-стадийный процесс синтеза, нами предложено вместо минеральных кислот использовать катионообменную смолу. Проведение такой реакции можно осуществить в двух режимах: статическом и динамическом.

*Электронные спектры исходных и нитрозированных ЛСК.* В результате нитрозирования ЛСК в молекулах появляются нитрозогруппы, которые являются сильными электроноакцепторными заместителями, влияющими на распределение электронной плотности в фенилпропановых единицах ЛСК. Это отражается и на электронных спектрах. Особенно сильно изменения выражены на спектрах ионизации (рис. 1).

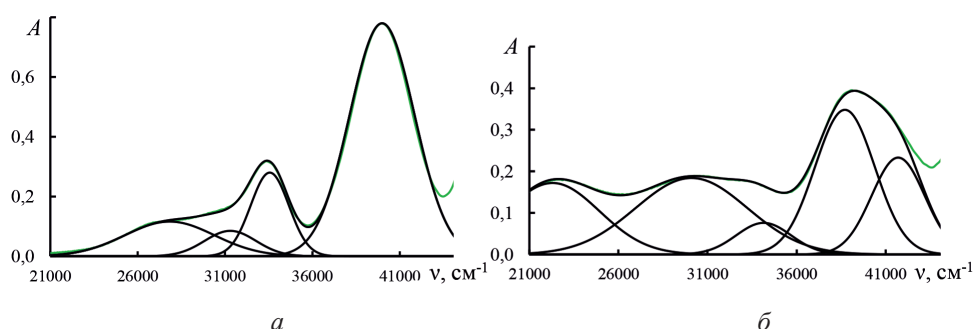
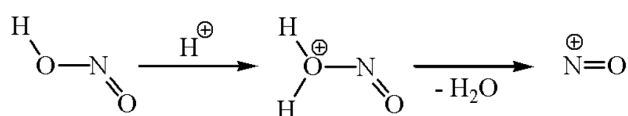


Рис. 1. Электронные спектры ионизации исходных (а) и нитрозированных (б) ЛСТ. Зеленым цветом обозначен экспериментальный спектр, черным – индивидуальные гауссианы и суммарный спектр

Fig. 1. The electronic ionization spectra of the initial (a) and nitrosated (b) Ls. Green indicates the experimental spectrum, black indicates individual Gaussians and the total spectrum

Как видно, спектр ионизации исходных ЛСТ является типичным для лигнинов [4]. Полосы поглощения при 40 000 и 33 300  $\text{cm}^{-1}$  (250 и 300 нм) связаны с поглощением фенольных ОН-групп, а поглощение в области 27 800... 27 030  $\text{cm}^{-1}$  (360...370 нм) обусловлено поглощением сопряженных карбонильных групп. Спектр ионизации нитрозированных ЛСК значительно отличается от спектра ионизации исходных ЛСК, особенно в области 35 700... 20 000  $\text{cm}^{-1}$  (280...500 нм). В этой области появились 2 перекрывающихся полосы с максимумами при 33 300 и 30 000  $\text{cm}^{-1}$  (300 и 330 нм) и новая интенсивная полоса поглощения при 23 300  $\text{cm}^{-1}$  (430 нм), которая была выбрана в качестве аналитической для дальнейших исследований. Дополнительно проведена деконволюция электронных спектров с помощью кривых Гаусса. Спектр нитрозированных ЛСК хорошо описывается 5 перекрывающимися полосами поглощения с максимумами при 240, 258, 293, 332 и 448 нм, интенсивности полос максимумов составили 0,233; 0,348; 0,076; 0,184; 0,172 соответственно, погрешность при этом – 1,4 %.

*Влияние расхода нитрита натрия.* При электрофильном механизме реакции нитрозирования в качестве нитрозирующего реагента выступает катион нитрозония ( $\text{NO}^+$ ), который образуется в результате протолиза азотистой кислоты:



Для определения оптимального расхода нитрита натрия была выполнена серия экспериментов, переменным фактором в них был расход нитрита натрия. Реакцию проводили при комнатной температуре при постоянном перемешивании на виброустановке. Контроль процесса нитрозирования осуществляли с помощью фотометрии. Кинетические зависимости, представленные на рис. 2, подобны кривым насыщения и характеризуются быстрым увеличением оптической плотности в первые 5 мин реакции, после чего скорость нитрозирования значительно уменьшается. Зависимость оптической плотности при 430 нм от расхода нитрита натрия при продолжительности реакции 60 мин свидетельствует о том, что оптимальный расход нитрита натрия составляет 15... ..20 % от массы ЛСТ (рис. 3).

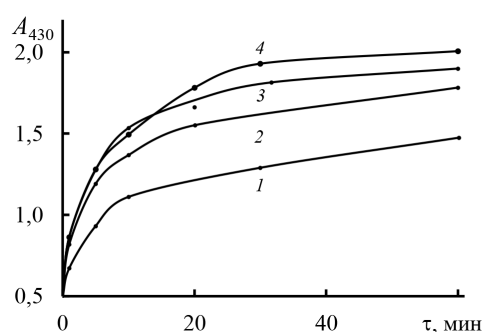


Рис. 2. Кинетические кривые нитрозирования ЛСТ при расходе (%)  $\text{NaNO}_2$ : 10 (1); 20 (2); 30 (3); 40 (4)

Fig. 2. The kinetic curves of LSs nitrosation at the  $\text{NaNO}_2$  consumption (%) of: 10 (1); 20 (2); 30 (3); 40 (4)

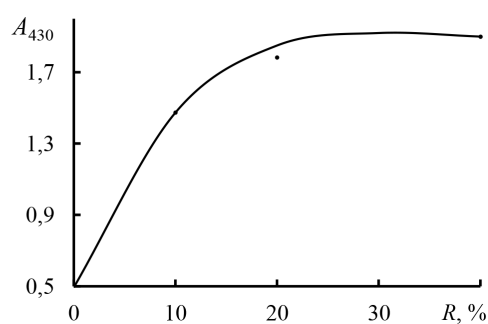


Рис. 3. Зависимость оптической плотности при 430 нм от расхода  $\text{NaNO}_2$  в конечной точке нитрозирования (60 мин) ЛСТ

Fig. 3. The dependence of absorbance at 430 nm on the  $\text{NaNO}_2$  consumption at the end point of nitrosation (60 min) of LSs

У ЛСК, нитрозованных в течение 60 мин, был определен элементный состав (табл. 1). С увеличением расхода нитрита до 15 % содержание азота в продуктах линейно увеличивается до 1,91 %, дальнейший рост расхода оказывает меньшее влияние на глубину нитрозирования.

Таблица 1

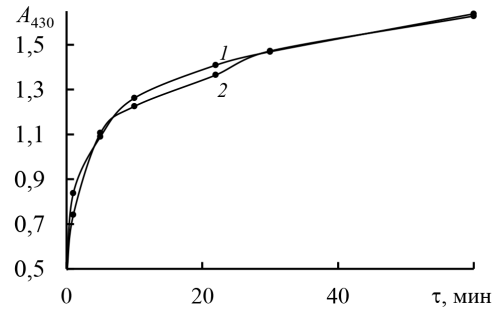
Элементный состав исходных и нитрозованных ЛСК  
The elemental composition of the initial and nitrosated LSAs

Расход $\text{NaNO}_2$ (% от ЛСТ)	Содержание элемента, %				
	N	C	H	S	O
0	0,32	47,10	5,54	4,80	42,24
5	0,94	44,46	5,03	5,17	44,40
10	1,37	42,67	4,81	5,11	46,04
15	1,91	43,39	5,08	4,92	44,70
20	2,17	43,14	4,83	5,12	44,74
25	2,13	43,22	4,83	5,48	44,34

*Динамика реакции нитрозирования.* При проведении реакции нитрозирования с катионитом КУ-2-8 была оценена динамика протекания реакции. Кроме того, для сравнения осуществлено нитрозирование с использованием 10%-й серной кислоты при одинаковых расходах ЛСТ и нитрита натрия. Как видно из рис. 4, реакция практически полностью протекает за 30 мин и не зависит от катализатора, за последующие 30 мин оптическая плотность при 430 нм увеличивается всего на 11 %.

Рис. 4. Кинетические кривые нитрозирования ЛСТ при использовании  $H_2SO_4$  (1) и катионита КУ-2-8 (2)

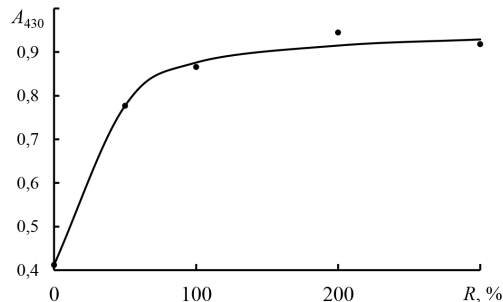
Fig. 4. The kinetic curves of LSs nitrosation using  $H_2SO_4$  (1) and KU-2-8 cation exchanger (2)



*Влияние расхода катионита.* Реакцию проводили на виброустановке при следующих условиях: комнатная температура, продолжительность реакции – 60 мин, расход  $NaNO_2$  – 40 % от массы ЛСТ. Результаты показаны на рис. 5, из которого видно, что для полного протекания реакции оптимальный расход катионита составляет примерно 100 % от массы ЛСТ.

Рис. 5. Зависимость оптической плотности при 430 нм от расхода катионита (%) при нитрозировании ЛСТ

Fig. 5. The dependence of absorbance at 430 nm on the cation exchanger consumption (%) during nitrosation of LSs



Кроме катионита КУ-2-8, в качестве твердофазного катализатора был использован вофатит. Кинетическая кривая нитрозирования с использованием вофатита, приведенная на рис. 6, аналогична кинетической кривой, полученной с использованием катионита КУ-2-8.

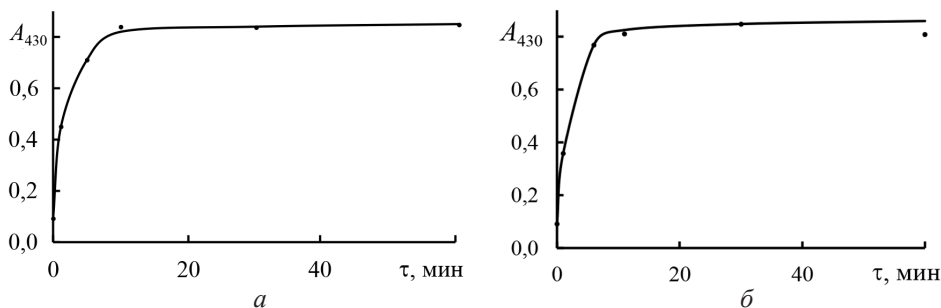


Рис. 6. Кинетические кривые нитрозирования ЛСТ при использовании КУ-2-8 (а) и вофатита (б)

Fig. 6. The kinetic curves of LSs nitrosation when using KU-2-8 (a) and wofatite (b)

*Изучение нитрозирования ЛСТ в динамических условиях.* При использовании катионитов для нитрозирования в статических условиях после завершения реакции требуется дополнительная стадия отделения катионита из реакционной среды с помощью фильтрования. Поэтому было предложено проводить нитрозирование в динамических условиях. По завершении реакции катионит можно промыть, регенерировать прямо в колонке и повторно использовать. Скорость прохождения реакционной смеси через колонку составляет 10 мин.

При осуществлении нитрозирования были последовательно отобраны образцы реакционной смеси по 10 мл. Измерены рН и определен катионный состав этих образцов. Результаты представлены в табл. 2. Нумерация образцов соответствует порядку выхода проб из колонки, исходные ЛСТ – проба 0. Для определения выхода нитрозированных ЛСК алиquotы реакционной смеси высушены до постоянной массы путем испарения при комнатной температуре и окончательного досушивания в вакуум-эксикаторе. Выход нитрозированных ЛСК составил от 81 до 101 % относительно исходной массы ЛСК.

Таблица 2

**Характеристика проб ЛСК, нитрозированных в динамических условиях**

**The characteristics of LSA samples nitrosated under dynamic conditions**

№ пробы	рН	Выход, % от ЛСК	Содержание катионов, мг/л			
			К	Na	Mg	Ca
0	5,0	–	0,8	146,0	0,4	1,6
1	1,4	81	0,6	5,4	0	0
2	1,2	95	1,0	7,0	0,1	1,0
3	1,1	96	0	3,5	0	0
4	1,1	101	0	0	0	0
5	1,1	99	0	0	0	0
6	1,2	101	0	0	0	0

О хорошем декатионировании нитрозированных в динамических условиях ЛСК свидетельствует то, что рН растворов не превышает 1,4 с тенденцией к уменьшению от пробы к пробе. Эти результаты подтверждаются данными, полученными с помощью ионной хроматографии. Наряду с катионами Na в первых пробах содержится минорное количество других катионов (К, Mg, Ca). Количество катионов Na в растворе исходных ЛСТ составило 146 мг/л, а в образцах нитрозированных ЛСК – не превысило 7 мг/л (концентрация ЛСК одинакова).

Нитрозированные ЛСК были охарактеризованы с помощью инфракрасной спектроскопии (рис. 7).

При расшифровке инфракрасных спектров использовали справочные данные [1]. На спектрах присутствуют полосы поглощения, относящиеся к разным структурным элементам:

- 1027, 1140 см<sup>-1</sup> – сульфогруппы;
- 1500, 1600 см<sup>-1</sup> – скелетные колебания ароматического кольца;
- 2940 см<sup>-1</sup> – валентные колебания С-Н-связей в метильных и метиленовых группах;
- 3400 см<sup>-1</sup> – валентные колебания ОН-групп, вовлеченных в водородную связь.



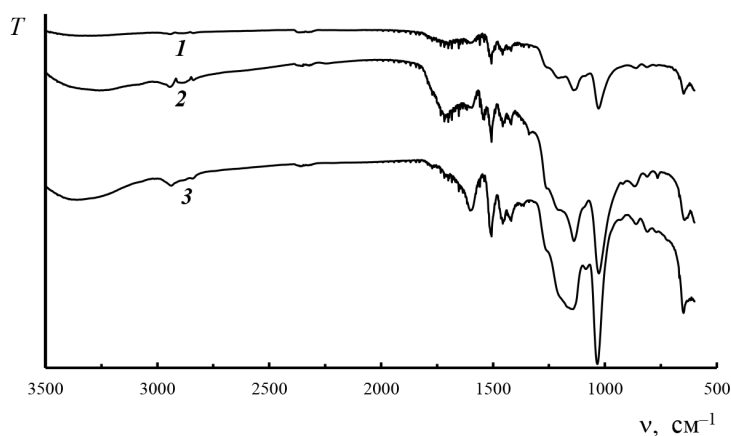


Рис. 7. ИК-спектры исходных ЛСК (1), нитрозированных ЛСК (2) и ЛСТ (3)

Fig. 7. The IR spectra of LSAs (1), nitrosated LSAs (2) and LSs (3)

На спектре нитрозированных ЛСК появились полоса поглощения с максимумом при  $1540\text{ см}^{-1}$ , обусловленная присутствием нитрозогрупп, и широкая полоса поглощения при  $1700\text{--}1715\text{ см}^{-1}$ , которая может быть вызвана колебаниями карбоксильной группы или хинонмонооксимной структуры.

#### Выводы

1. Разработан метод получения нитрозированных лигносульфоновых кислот, который основан на проведении реакции, катализируемой катионообменными смолами.

2. Изучено влияние расхода реагентов и продолжительности реакции на протекание нитрозирования лигносульфоновых кислот.

3. Нитрозированные лигносульфоновые кислоты имеют новые полосы поглощения на электронных спектрах, характерные для ароматических нитрозосоединений, содержание азота достигает  $2,17\%$ .

4. Предложено два варианта реализации нитрозирования лигносульфоновых кислот: в статических и динамических условиях. Установлено, что в динамических условиях достигается полное декатионирование, а pH растворов нитрозированных лигносульфоновых кислот не превышает  $1,4$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Иностр. лит., 1963. 590 с.

Bellamy L. *The Infra-Red Spectra of Complex Molecules*. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1963. 590 p. (In Russ.).

2. Гоготов А.Ф. Нитритные обработки небеленых целлюлоз с последующей кислородно-щелочной делигнификацией // Химия растит. сырья. 1999. № 1. С. 89–97.

Gogotov A.F. Nitrite Treatments of Unbleached Pulps Followed by Oxygen-Alkaline Delignification. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 1999, no. 1, pp. 89–97. (In Russ.).

3. Гоготов А.Ф., Заказов А.Н., Бабкин В.А. Нитритная методика анализа бумажных композиций // Химия растит. сырья. 2001. № 2. С. 39–46.  
Gogotov A.F., Zakazov A.N., Babkin V.A. Nitrite Method for Analyzing Paper Compositions. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 2, pp. 39–46. (In Russ.).
4. Закус Г.Ф., Можейко Л.Н., Тельешева Г.М. Методы определения функциональных групп лигнина. Рига: Зинатне, 1975. 174 с.  
Zakis G.F., Mozheiko L.N., Telysheva G.M. *Methods for Determining Functional Groups of Lignin*. Riga, Zinatne Publ., 1975. 174 p. (In Russ.).
5. Сайкс П. Механизмы реакций в органической химии. 4-е изд. М.: Химия, 1991. 448 с.  
Sykes P. *A Guidebook to Mechanism in Organic Chemistry*. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 448 p. (In Russ.).
6. Хабаров Ю.Г., Кошутина Н.Н. Изменение комплексообразующих свойств лигносульфонатов путем нитрозирования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 5-6. С. 134–139.  
Khabarov Yu.G., Koshutina N.N. Changing of Complexing Properties of Lignosulfonates by Nitrosating. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2001, no. 5-6, pp. 134–139. (In Russ.).
7. Хабаров Ю.Г., Песьякова Л.А., Колыгин А.В. Использование азотистой кислоты при определении лигносульфоновых кислот // Журн. приклад. химии. 2006. Т. 79, вып. 9. С. 1571–1574.  
Khabarov Yu.G., Pes'yakova L.A., Kolygin A.V. Nitrosation of Lignosulfonic Acids for Their Colorimetric Determination. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2006, vol. 79, iss. 9, pp. 1555–1558. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1070427206090333>
8. Химия нитро- и нитрозогрупп / под ред. Г. Фойера. Т. 1. М.: Мир, 1972. 536 с.  
*The Chemistry of the Nitro and Nitroso Groups. Vol. 1*. Ed. by H. Feuer. Moscow, Mir Publ., 1972. 536 p. (In Russ.).
9. Химия нитро- и нитрозогрупп / под ред. Г. Фойера. Т. 2. М.: Мир, 1973. 301 с.  
*The Chemistry of the Nitro and Nitroso Groups. Vol. 2*. Ed. by H. Feuer. Moscow, Mir Publ., 1973. 301 p. (In Russ.).
10. Berlin A., Balakshin M. Chapter 18 – Industrial Lignins: Analysis, Properties, and Applications. *Bioenergy Research: Advances and Applications*, 2014, pp. 315–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59561-4.00018-8>
11. Duval A., Lawoko M. A Review on Lignin-Based Polymeric, Micro- and Nano-Structured Materials. *Reactive and Functional Polymers*, 2014, vol. 85, pp. 78–96. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017>
12. Graupner N. Application of Lignin as Natural Adhesion Promoter in Cotton Fibre-Reinforced Poly(Lactic Acid) (PLA) Composites. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43, pp. 5222–5229. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2762-3>
13. Housecroft C.E., Sharpe A.G. *Inorganic Chemistry*. 4th ed. London, Pearson Education Limited, 2012. 1213 p.
14. Kazzaz A.E., Fatehi P. Technical Lignin and its Potential Modification Routes: A Mini-Review. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 154, art. no. 112732. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112732>
15. Laurichesse S., Avérous L. Chemical Modification of Lignins: Towards Biobased Polymers. *Progress in Polymer Science*, 2014, vol. 39, iss. 7, pp. 1266–1290. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004>
16. Liu Y. *Tert*-Butyl Nitrite. *Synlett*, 2011, iss. 8, pp. 1184–1185. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1259948>

17. Mimini V., Kabrelian V., Fackler K., Hettegger H., Potthast A., Rosenau T. Lignin-Based Foams as Insulation Materials: a Review. *Holzforschung*, 2019, vol. 73, no. 1, pp. 117–130. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0111>

18. Miyahara M., Kamiya S., Nakadate M. Nitrosation of 1,3-Diarylureas with Nitrosyl Chloride, Dinitrogen Trioxide and Dinitrogen Tetroxide in Dimethylformamide. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 1983, vol. 31, iss. 1, pp. 41–44. <https://doi.org/10.1248/cpb.31.41>

19. Pearl I.A., Benson H.K. A Nitrosolignin Colorimetric Test for Sulfite Waste Liquor in Sea Water. *Paper Trade Journal*, 1940, vol. 111, pp. 235–236.

20. Shchavlev A.E., Pankratov A.N., Enchev V. Intramolecular Hydrogen-Bonding Interactions in 2-Nitrosophenol and Nitrosonaphthols: Ab Initio, Density Functional, and Nuclear Magnetic Resonance Theoretical Study. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2007, vol. 111, iss. 30, pp. 7112–7123. <https://doi.org/10.1021/jp068540r>

21. Strassberger Z., Tanase S., Rothenberg G. The Pros and Cons of Lignin Valorisation in an Integrated Biorefinery. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, iss. 48, pp. 25310–25318. <https://doi.org/10.1039/C4RA04747H>

**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 676.163.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-188-202

### Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов

**Ф.Х. Хакимова**, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [IUO-5370-2023](https://orcid.org/0000-0002-0409-4548),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0409-4548>

**О.А. Носкова**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [IUO-5323-2023](https://orcid.org/0000-0001-9216-099X),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9216-099X>

**Р.Р. Хакимов**, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [IUO-7064-2023](https://orcid.org/0009-0007-1782-2552),

*ORCID*: <https://orcid.org/0009-0007-1782-2552>

**И.И. Фонарёв**, аспирант; *ResearcherID*: [IUO-6822-2023](https://orcid.org/0009-0002-9470-8052),


*ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-9470-8052>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, просп. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; [tcbp@pstu.ru](mailto:tcbp@pstu.ru), [oa-noskova@mail.ru](mailto:oa-noskova@mail.ru)<sup>✉</sup>, [roman\\_etf@mail.ru](mailto:roman_etf@mail.ru), [fonarev22@yandex.ru](mailto:fonarev22@yandex.ru)

Поступила в редакцию 10.09.23 / Одобрена после рецензирования 06.12.23 / Принята к печати 08.12.23

**Аннотация.** Исследована утилизация отходов переработки древесины, образующихся на целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятиях, путем повторного использования при получении полуфабриката высокого выхода для производства бумаги и картона. Экономическая и экологическая целесообразность рекуперации древесных отходов не вызывает сомнений. Цель – разработка технологии и режимов утилизации древесных отходов производства целлюлозы высокого выхода (березовых опилок) и деревообработки (хвойных и смеси хвойных и лиственных стружек). В ходе исследования целлюлозу высокого выхода из березовых опилок получали по непрерывной технологии, как на предприятии «Пермская целлюлозно-бумажная компания», и по периодической, как на большинстве предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Из стружек деревообработки варки проводили только по периодической технологии. Показано, что утилизация березовых опилок с получением волокнистого полуфабриката для применения при производстве бумаги и картона решает важную экономическую проблему целлюлозно-бумажной отрасли, заключающуюся в необходимости снижения расхода балансовой древесины и сохранения лесных ресурсов. Процесс утилизации древесных отходов не требует изменений действующей технологии. При этом получается целлюлоза высокого выхода, которая по показателям качества не уступает аналогичному полуфабрикату из березовой технологической щепы и соответствует нормам предприятия. Выявлено, что стружку древесных отходов из хвойной и лиственной древесины деревообрабатывающих предприятий также можно использовать как сырье для получения целлюлозы высокого выхода, но только совместно с опилками из березовой древесины. Целлюлоза высокого выхода из стружки хвойной и смеси хвойной и лиственной древесины получается повышенного выхода, но с низкой механической прочностью, т. к. нейтрально-сульфитный способ предназначен для изготовления волокнистого полуфабриката только из лиственной древесины; хвойная древесина этим способом не проваривается. Целлюлозу высокого выхода с показателями качества, соответствующими нормам предприятия для этого

© Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р., Фонарёв И.И., 2024

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

продукта из технологической щепы, дают соотношения стружек и опилок 50:50 и 70:30. Выход полуфабриката из сырья всех использованных композиций высокий – 75...82 %. Испытания целлюлозы высокого выхода из березовых опилок показали, что волокнистый полуфабрикат может заменить на производстве в композиции бумаги и картона по 20 % макулатурной массы марки МС-5Б.

**Ключевые слова:** древесные отходы, опилки, стружка, переработка, целлюлоза высокого выхода, бумага для гофрирования, картон, бумажная композиция, качество бумажного волокна, испытания образцов

**Для цитирования:** Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р., Фонарёв И.И. Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 188–202. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-188-202>

Original article

### Integrated Recycling of Lignin-Containing Wood Waste

**Firdaves Kh. Khakimova**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [IUO-5370-2023](https://orcid.org/0000-0002-0409-4548),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-4548>

**Ol'ga A. Noskova**✉, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [IUO-5323-2023](https://orcid.org/0000-0001-9216-099X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9216-099X>

**Roman R. Khakimov**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [IUO-7064-2023](https://orcid.org/0009-0007-1782-2552),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1782-2552>

**Ilya I. Fonarev**, Postgraduate Student; ResearcherID: [IUO-6822-2023](https://orcid.org/0009-0002-9470-8052),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9470-8052>

Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolskiy, 29, Perm, 614990, Russian Federation; [tcbp@pstu.ru](mailto:tcbp@pstu.ru), [oa-noskova@mail.ru](mailto:oa-noskova@mail.ru)✉, [roman\\_etf@mail.ru](mailto:roman_etf@mail.ru), [fonarev22@yandex.ru](mailto:fonarev22@yandex.ru)

Received on September 10, 2023 / Approved after reviewing on December 6, 2023 / Accepted on December 8, 2023

**Abstract.** The recycling of wood processing waste generated at pulp and paper and woodworking enterprises by reusing it in obtaining a high-yield semi-finished product for the production of paper and cardboard has been studied. The economic and environmental feasibility of wood waste recovery is beyond doubt. The aim has been to develop technology and modes for recycling wood waste from the production of high-yield pulp (birch sawdust) and woodworking (coniferous and the mix of coniferous and deciduous chips). In the course of the study, high-yield pulp has been obtained from birch sawdust using continuous technology (at Perm Pulp and Paper Company) and batch technology (at most pulp and paper industry enterprises). Cooking of wood chips has been carried out only using batch technology. It is shown that the recycling of birch sawdust to produce a fibrous semi-finished product for use in the production of paper and cardboard solves an important economic problem of the pulp and paper industry, which is the need to reduce the consumption of pulpwood and preserve forest resources. The process of recycling wood waste does not require changes to current technology. This produces high-yield pulp, which in terms of quality is not inferior to a similar semi-finished product made from birch technological chips and meets the enterprise standards. It has been revealed that wood chips from coniferous and deciduous wood from woodworking enterprises can also be used as a raw material for the

production of high-yield pulp, but only together with sawdust from birch wood. High-yield pulp from the chips of coniferous and the mix of coniferous and deciduous wood is obtained with increased yield, but with low mechanical strength, since the neutral-sulfite method is intended for the production of a fibrous semi-finished product only from deciduous wood; coniferous wood is not boiled using this method. High-yield pulp with quality indicators corresponding to the enterprise standards from technological chips is produced by the ratios of chips and sawdust of 50:50 and 70:30. The yield of the semi-finished product from the raw materials of all used compositions is high – 75...82 %. Tests of high-yield pulp obtained from birch sawdust have shown that the fibrous semi-finished product can replace 20 % of the MS-5B waste paper mass in production in the production of paper and cardboard compositions.

**Keywords:** wood waste, sawdust, chips, recycling, high-yield pulp, fluting paper, cardboard, paper composition, paper grain quality, sample testing

**For citation:** Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Khakimov R.R., Fonarev I.I. Integrated Recycling of Lignin-Containing Wood Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 188–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-188-202>

### *Введение*

Вопросы эффективного использования древесного сырья путем переработки древесных отходов на целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятиях являются актуальными и требуют решения.

К сожалению, в России не уделяется серьезного внимания переработке всей биомассы дерева в целях снижения потерь древесины и сохранения лесных ресурсов [2, 23].

Промышленные древесные отходы (стружка, опилки) могут служить сырьем для изготовления целлюлозно-бумажной продукции [1, 10, 24]. Использование древесных отходов в целлюлозно-бумажной промышленности экономически целесообразно, т. к. уменьшает расход балансовой древесины при получении целлюлозы и бумаги, а также повышает экологическую безопасность предприятия за счет снижения пожароопасности и вредных газовых выбросов в окружающую среду от гниения отходов и развития в них микроорганизмов.

Один из путей соблюдения современных требований рационального природопользования в сфере применения растительного сырья – организация на предприятиях химической переработки древесины получения полезного продукта из отходов по технологиям, аналогичным технологии получения целевого продукта предприятия, например производство древесно-волоконистых плит, различной картонно-бумажной продукции и др. Особого внимания заслуживает применение древесных отходов в виде опилок и стружек [1, 25, 26].

Работы в области использования древесных отходов в мировой практике проводятся широко и имеют эффективные результаты, но заявленная проблема остается и вопросы экономики и экологии рециклинга древесных отходов актуальны [8, 15, 17, 27]. Повышение эффективности комплексного использования древесного сырья способствует ресурсосбережению, улучшению экологической обстановки лесной отрасли [5, 7].

Необходимость утилизации древесных отходов и более рационального применения ресурсов биомассы древесины в зарубежной практике связаны с ростом потребности в лесопродукции, а также дефицитом и высокой стоимостью стволовой древесины [3, 4, 6, 9].

Все направления работ по ресурсосбережению перспективны, в мировой практике распространена переработка древесных отходов в целлюлозу, древесностружечные и древесноволокнистые материалы, а также использование таких отходов при очистке сточных вод лесохимических, гидролизных и других предприятий химической переработки древесины [18, 19]. Важной является переработка различных видов бумажной и картонной макулатуры по современным экономичным и экологичным технологиям [20].

Представляют большой интерес технологии получения волокнистых полуфабрикатов из опилок и стружек. Положительные результаты дали исследования по перексидной варке древесных опилок разных пород [14], по получению целлюлозы из стружек еловой древесины методом катализируемой перексидной варки в кислой среде с последующей щелочной экстракцией [13], а также из опилок древесины лиственницы, хвойных древесных отходов деревообработки (опилок, стружек) с использованием органо-сольвентной варки смесью уксусной кислоты и пероксида водорода [11, 16]. В России на одном из сибирских предприятий работает установка по непрерывной варке из древесных опилок сульфатной целлюлозы для производства картона [18].

Авторы в течение ряда лет проводят исследования в области утилизации древесных отходов лесозаготовок, химической и механической переработки древесины (березы, осины, ели и пихты) с получением волокнистых полуфабрикатов. Показана возможность и целесообразность производства из этих отходов бисульфитной и нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы для использования в композиции тарного картона [12, 21, 22]. Однако древесные отходы (в виде стружек) деревообрабатывающих предприятий не находят широкого применения.

Таким образом, актуальность, экономическая и экологическая целесообразность и эффективность утилизации древесных отходов лесозаготовок, деревообработки и целлюлозных производств не вызывают сомнений.

Цель работы – предложить технологию утилизации древесных отходов (березовых опилок, хвойных и смеси хвойных и лиственных стружек) целлюлозно-бумажного производства и деревообрабатывающих предприятий.

Задача – разработка условий для всех этапов производства с использованием древесных отходов для получения целлюлозы высокого выхода (ЦВВ).

#### *Объекты и методы исследования*

Для получения ЦВВ использованы березовые опилки (сортирование через сито с диаметром отверстий 2...5 мм) – отходы от подготовки древесины для получения ЦВВ целлюлозно-бумажного предприятия (образец сырья 1).

Кроме того, взяты древесные отходы в виде стружки 2 деревообрабатывающих комбинатов. Из древесных отходов хвойных пород для варок выделена стружка, пригодная для получения ЦВВ, в количестве 64 % (образец 2), а из стружек хвойных и лиственных пород (ель и осина) – 52 % (образец 3).

Исследования процесса получения ЦВВ из березовых опилок выполняли применительно к условиям предприятия «Пермская целлюлозно-бумажная компания» (ПЦБК) по непрерывной технологии, а также – для использования разработки в других условиях – по периодической технологии, из стружек деревообработки – только по периодической технологии.

По непрерывной технологии в лаборатории Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) воспроизведены все стадии и условия обработки древесины из технологической березовой щепы на производстве при помощи установки «Дефибратор».

Использован нейтрально-сульфитный варочный раствор предприятия ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH}$ ), содержащий  $\text{SO}_2$ : всего – 6,5–7,5 %; связанного – 2,7–3,5 %.

Варки ЦВВ проводили в лабораторном варочном аппарате (автоклаве) вместимостью 2 л. Процесс варки по непрерывной технологии включал следующие стадии:

пропитка опилок нейтрально-сульфитным варочным раствором (рН раствора – 10,2–10,8) при температуре 100 °С, гидромодуль варки – 5,5;

варка целлюлозы при температуре 165–175 °С;

горячий размол сваренной ЦВВ в центробежном размалывающем аппарате (ЦРА);

промывка и сортирование целлюлозы;

холодный размол в ЦРА.

Периодическую варку целлюлозы проводили аналогично сульфитной варке, особенность заключалась в отсутствии промежуточной стоянки для пропитки щепы. Промывку и сортирование ЦВВ, ее холодный размол осуществляли после горячего размола (как по непрерывной технологии варки).

Стандартные методики, использованные для анализа технологических процессов и показателей целлюлозы, следующие: для установления влажности – ГОСТ 50316–92; для подготовки проб к физико-механическим испытаниям – ГОСТ 14363.4–89; для определения сопротивления разрыву с перерасчетом на разрывную длину – ГОСТ 1924-1–96, сопротивления продавливанию – ГОСТ 13525.8–86, прочности на излом – ГОСТ 13525.2–80, плоскостного сжатия гофрированного образца бумаги – ГОСТ 20682–75, торцового сжатия гофрированного образца бумаги – ГОСТ 28686–90, разрушающего усилия при сжатии кольца – ГОСТ 10711–97.

Отливки бумаги из ЦВВ для определения физико-механических показателей получали на листоотливном аппарате ЛА-2.



*Результаты исследования и их обсуждение*

Сведения о результатах варок березовых опилок по периодической и непрерывной технологиям приведены в табл. 1. Выход ЦВВ в данном случае соответствует требованиям предприятия.

Таблица 1

**Характеристика ЦВВ при варке березовых опилок  
по периодической и непрерывной технологиям**  
**The characteristics of high-yield pulp when cooking birch sawdust using  
batch and continuous technologies**

Показатель ЦВВ (100 г/м <sup>2</sup> )	Периодическая варка	Непрерывная варка	Нормы предприятия для ЦВВ из технологической щепы
Выход, %	72,5...75,5	64,6...67,9	Не менее 70
Продолжительность размола, мин	5,0...5,5	5,0...5,5	–
Степень помола, °ШР	24...29	23...29	24...33
Разрывная длина, м	6630...7300	6810...7400	2500...3000
Сопротивление продавливанию, кПа	288	323	Не менее 280
Сопротивление плоскостному сжатию, Н	290	330	Не менее 310
Сопротивление торцовому сжатию, кН/м	2,2	2,3	Не менее 1,9

Примечание: Приведены данные по результатам 4 параллельных варок каждого образца.

Из табл. 1 видно, что почти все показатели качества образцов ЦВВ из березовых опилок близки к нормам предприятия для такой же продукции из технологической щепы. Отмечается легкая размалываемость полуфабриката, что важно для процессов его производства.

Сравнение результатов варок березовых опилок с нормами предприятия для ЦВВ из технологической березовой щепы указывает на следующие различия:

выход ЦВВ из опилок по непрерывной технологии составляет 65...68 %, т. е. ниже, чем у волокнистого полуфабриката из кондиционной технологической щепы, полученного в производственных условиях, что объясняется использованием при исследовании мелкого древесного сырья (опилок) вместо щепы; выход ЦВВ по периодической технологии выше, чем у целлюлозы из производственной щепы (75 против 70 %), что является положительным фактором;

образцы ЦВВ, изготовленные по непрерывной и периодической технологиям варки, легко размалываются в течение 5,0...5,5 мин, что значительно меньше, чем для сульфитной целлюлозы;

по механической прочности образцы существенно не отличаются, показатель зависит от степени помола.

В табл. 2 даны результаты периодических варок исследованных видов сырья.

Таблица 2

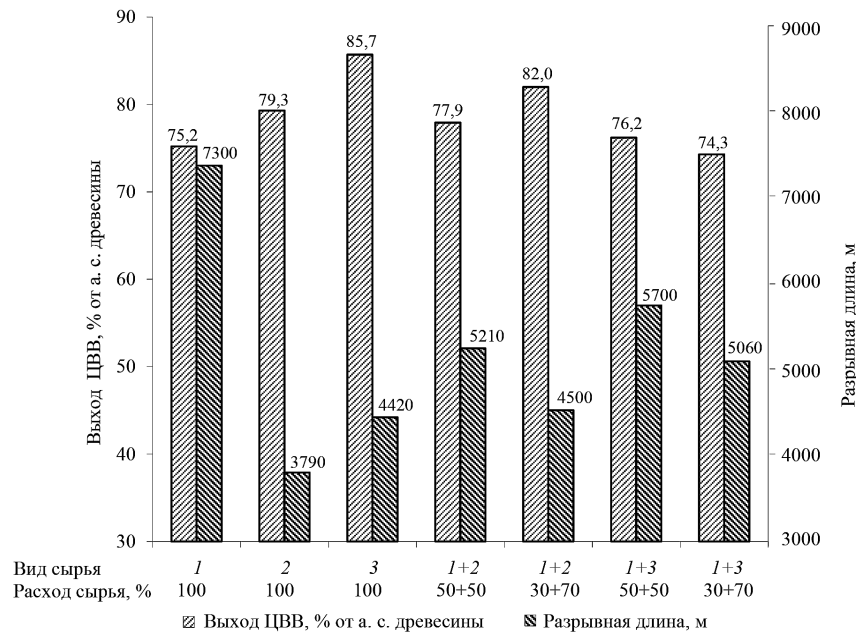
**Влияние состава сырья на выход и качество ЦВВ  
при варке по периодической технологии**  
**The influence of raw material composition on the yield and quality of high-yield pulp  
when cooking using batch technology**

Образец ЦВВ	Состав сырья, %			Выход ЦВВ, % от а. с. древесины	Продолжительность размола, мин	Степень помола, °ШР	Разрывная длина, м
	1	2	3				
1	100	–	–	75,5	5	24	6630
2				75,2	5,5	27	7300
3	–	100	–	79,3	10	24	2450
4					15	31	3790
5	–	–	100	85,7	13	26	3000
6					15	30	4420
7	50	50	–	77,9	10		32
8					13	5280	
9	30	70	–	82,0	8,5	20	3220
10					10	29	4500
11	50	–	50	76,2	7	28	5700
12					8,5	34	5790
13	30	–	70	74,3	7,5	24	4860
14					10	28	5060
15		30	40	81,6		27	4770
15-1				9	24	3240	
16		40	30	81,6	10	22	2970
16-1				82,0	12	27	4700
Нормы предприятия для ЦВВ из технологической щепы				Не менее 70	–	24...30	2500...3000

Примечание: а. с. – абсолютно сухое состояние.

Для наглядности и более удобного анализа результатов варок данные по двум наиболее важным показателям – выходу и разрывной длине ЦВВ – приведены на рисунке.

Из стружки хвойных пород древесины получена целлюлоза повышенного выхода (~79 %), но низкой прочности (см. рисунок). Это объясняется тем, что нейтрально-сульфитный способ предназначен для варки только лиственной целлюлозы – хвойная древесина не проваривается и из нее получается целлюлоза с выходом, заметно превышающим нормы предприятия, и, соответственно, низкой прочности – разрывная длина (образцов 3 и 4) составила 2450...3790 м в зависимости от степени помола (24...31 °ШР).



Изменение выхода и разрывной длины ЦВВ в зависимости от состава сырья.

Разрывная длина определена при степени помола 27...30 °ШР

The changes in the yield and breaking length of high-yield pulp depending on raw material composition. The breaking length has been determined at a degree of grinding of 27...30 °SR

Использование стружки хвойно-лиственной смеси дает выход полуцеллюлозы 86 %, но качество продукта низкое: разрывная длина – 3000...4400 м (образцы 5, 6).

При варке стружки из хвойной древесины с добавлением березовых опилок (соотношение 70:30, образцы 9, 10) разрывная длина получаемой ЦВВ заметно повышается (при выходе 82 %).

Для получения ЦВВ удовлетворительного качества может быть рекомендовано сырье из стружки хвойной древесины и березовых опилок в соотношении 1:1 (образцы 7, 8) – даже при высоком выходе (78 %) из этого сырья получается ЦВВ с хорошей механической прочностью (разрывная длина – 5200...5300 м) и по качеству соответствующая нормам для ЦВВ из технологической щепы.

Смесь стружек из хвойной и лиственной древесины с добавлением березовых опилок в исследованных нами соотношениях (1:1 и 2,5:1; соответственно образцы 11, 12 и 13, 14) позволяет получить ЦВВ требуемого качества: при выходе 74...76 % она имеет достаточную разрывную длину – 4860...5700 м, однако уступающую ЦВВ из березовых опилок на 1000...2000 м.

Таким образом, композиция древесного сырья из стружек смеси хвойной и лиственной древесины с березовыми опилками может быть рекомендована при получении ЦВВ – полуфабриката с использованием его в производстве картона. Процесс получения ЦВВ трудностей не вызывает.

Результаты изготовления ЦВВ из сырья, представляющего смеси всех 3 видов древесных отходов в различных соотношениях (образцы 15 и 16), положительные. Разрывная длина образцов ЦВВ соответствует нормам предприятия для обычной ЦВВ из щепы.

Некоторые трудности переработки древесной стружки вызывает ее низкая насыпная плотность, следствием чего является неэффективное использование емкости автоклава (котла), поэтому необходимо дополнительное уплотнение стружки.

Наиболее плотно укладываются в автоклаве березовые опилки равномерного фракционного состава.

Выход ЦВВ линейно увеличивается с возрастанием в исходном сырье содержания хвойной древесины. Это связано с тем, что хвойная древесина в нейтральной среде не проваривается, т. к. в этих условиях реакции сульфирования может подвергаться только около 30 % лигнина (группа А). Поэтому на практике нейтрально-сульфитным способом хвойную древесину не перерабатывают. В этом случае нейтрально-сульфитная варка из хвойной древесины дает, вероятно, полуфабрикат, аналогичный химико-термомеханической массе. В связи с этим механическая прочность ЦВВ с увеличением количества хвойной древесины в исходном сырье снижается.

Размол всех образцов ЦВВ проводился в одинаковых условиях в ЦРА. Продолжительность процесса для различных образцов позволяет дать сравнительную оценку размалываемости образцов ЦВВ. Из данных табл. 2 следует, что легче всего размалывается листовенная (березовая) ЦВВ, т. е. расход электроэнергии на размол этого полуфабриката примерно в 2 раза меньше, чем ЦВВ, полученной с включением в композицию стружек из хвойной и смеси хвойной и листовенной древесины. Расход электроэнергии при размоле зависит главным образом от содержания хвойной древесины в исходном сырье. Как видно из данных табл. 2, наибольшее количество электроэнергии требуется для размола ЦВВ из древесных отходов (стружки) из-за наличия в их составе отходов хвойной древесины. Расход электроэнергии на размол ЦВВ из смеси всех 3 образцов исходного сырья занимает промежуточное положение.

ЦВВ из смеси всех видов использованных древесных отходов (образцы 15 и 16) по разрывной длине несколько уступают этому полуфабрикату из березовых опилок, но все они соответствуют нормам для ЦВВ из березовой технологической щепы.

Образцы ЦВВ из березовых опилок, полученный авторами в лабораторных условиях на кафедре ПНИПУ, был передан в исследовательскую лабораторию ПЦБК для проведения испытаний с определением возможности и целесообразности использования полуфабриката в композиции картонно-бумажной продукции. В табл. 3 представлены показатели качества опытного образца ЦВВ по данным лаборатории предприятия.

Полученные характеристики опытного образца ЦВВ из березовых опилок сопоставимы с нормами для ЦВВ из технологической щепы (по регламенту предприятия) и даже несколько превышают их.

Таблица 3

**Характеристика опытных образцов ЦВВ из березовых опилок**  
**The characteristics of test samples of high-yield pulp from birch sawdust**

Показатель ЦВВ (100 г/м <sup>2</sup> )	ЦВВ из опилок	ЦВВ из технологической щепы по регламенту предприятия
Степень помола, °ШР	32	24...33
Разрывная длина, м	6320	Не менее 5000
Соппротивление продавливанию, кПа	458	Не менее 280
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	8,47	Не менее 8,0
Соппротивление плоскостному сжатию, Н	370	Не менее 310
Соппротивление торцовому сжатию, кН/м	2,8	Не менее 1,9
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	387	Не менее 353

Примечание: Приведены средние значения показателей 7 испытанных образцов целлюлозы.

На предприятии в исследовательской лаборатории проведены опытные испытания с использованием в композиции бумаги и картона целлюлозы из березовых опилок и полуфабрикатов из производственного потока: ЦВВ со степенью помола 29 °ШР; макулатурной массы марки МС-5Б (ММ) со степенью помола 27 °ШР. Получили 2 образца бумаги для гофрирования: 80 % ЦВВ предприятия и 20 % ММ (существующая); 80 % ЦВВ предприятия и 20 % ЦВВ из березовых опилок. Результаты этой серии опытов представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Влияние композиционного состава бумажной массы на показатели качества бумаги для гофрирования**  
**The influence of paper pulp composition on the quality indicators of fluting paper**

Показатель полученной бумаги (135 г/м <sup>2</sup> )	Образец из ЦВВ предприятия и ММ	Образец из ЦВВ предприятия и ЦВВ из опилок	ГОСТ 53206–2008 (125 г/м <sup>2</sup> )
Степень помола, °ШР	30	32	–
Обезвоживаемость, с	36,4	38,3	–
Разрывная длина, м	5310	5670	–
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	7,2	8,0	Не менее 8,0
Соппротивление продавливанию, кПа	489	487	Не менее 320
Соппротивление плоскостному сжатию, Н	319	386	Не менее 310
Соппротивление торцовому сжатию, кН/м	2,71	2,79	Не менее 1,35

Замена в композиции бумаги ММ опытной ЦВВ не снижает качество готовой продукции. Введение в композицию бумаги для гофрирования опытного образца (ЦВВ из опилок) увеличивает удельное сопротивление разрыву и сопротивление плоскостному сжатию, остальные показатели качества и обезвоживаемость остаются на прежнем уровне. Причем все показатели качества бумаги, в композиции которой использован опытный образец ЦВВ, соответствуют требованиям ГОСТ 53206–2008.

Для использования опытного полуфабриката из опилок березы при изготовлении картона получено 3 образца: 100 % ММ (существующая); 90 % ММ + 10 % опытного полуфабриката из опилок; 80 % ММ + 20 % опытного полуфабриката из опилок.

По данным табл. 5, оптимальным вариантом опытного полуфабриката является образец из 80 % ММ и 20 % ЦВВ из опилок. В сравнении с исходным вариантом (100 % ММ) абсолютное сопротивление продавливанию повысилось на 20 %, остальные показатели сохранились на прежнем уровне. Однако сопротивление продавливанию картонной массы ниже норм, прописанных в технических условиях, что объясняется низким значением этого показателя у ММ (303 кПа).

Таблица 5

**Влияние композиционного состава картонной массы на качество картона**  
**The influence of cardboard pulp composition on cardboard quality**

Показатель полученного картона (135 г/м <sup>2</sup> )	Образец из ММ	Образец из ММ (90 %) и ЦВВ из опилок (10 %)	Образец из ММ (80 %) и ЦВВ из опилок (20 %)	ТУ 5441-073-24086615–2014 (135 г/м <sup>2</sup> )
Степень помола, °ШР	27	30	30	Не менее 27
Обезвоживаемость, с	28,3	31,0	32,3	–
Сопротивление продавливанию, кПа	303	356	363	Не менее 460
Прочность на излом (число двойных перегибов)	53	51	44	Не менее 10
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	259	252	256	Не менее 150

Анализ полученных образцов картона выявил, что по всем показателям качества, кроме прочности на излом, образцы картона, изготовленные с использованием ЦВВ, имеют лучшие характеристики по сравнению с исходным образцом из 100 % ММ. Однако нормам ТУ не соответствует сопротивление продавливанию всех образцов, что связано с очень низким значением показателя ММ, присутствующей во всех образцах.

Из березовых опилок получается ЦВВ с хорошими показателями качества, особенно высокими механической прочностью и бумагообразующими свойствами, пригодная к использованию в композиции картона без ухудшения прочностных свойств готового продукта.

*Выводы*

1. Утилизация древесных отходов с целью их использования посредством включения в цикл основного производства с получением целлюлозно-бумажной продукции рациональна при изготовлении целлюлозы высокого выхода нейтрально-сульфитным способом по непрерывной и периодической технологиям. Получаемая целлюлоза соответствует нормам предприятия для целлюлозы высокого выхода из технологической щепы.

2. Стружка из хвойной древесины и смесь хвойных и лиственных стружек также могут служить сырьем для получения волокнистого полуфабриката высокого выхода, но только при использовании вместе с опилками из березовой древесины. Исследованные соотношения (стружка:опилки – 50:50 и 70:30) дают полуфабрикат, показатели качества которого соответствуют нормам предприятия для целлюлозы высокого выхода из технологической щепы.

3. Выход полуфабриката из сырья всех использованных композиций высок – 75...82 %.

4. Испытания опытного образца целлюлозы высокого выхода из березовых опилок показали, что полуфабрикат по качеству не уступает производственной целлюлозе высокого выхода и может быть использован в композициях бумаги и картона без ухудшения их характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Альберг Н.И., Санжиева С.Е., Салхофер С. Комплексное устойчивое управление отходами. Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность. М.: Акад. естествознания, 2016. 308 с.

Al'berg N.I., Sanzhieva S.E., Salkhofer S. *Integrated Sustainable Waste Management. Woodworking and Pulp and Paper Industry*. Moscow, Academy of Natural History Publ., 2016. 308 p. (In Russ.).

2. Беловежец Л.А., Волчатова И.В., Медведева С.А. Перспективные способы переработки вторичного лигноцеллюлозного сырья // Химия растит. сырья. 2010. № 2. С. 5–16.

Belovezhets L.A., Volchatova I.V., Medvedeva S.A. Promising Methods for Processing Secondary Lignocellulosic Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2010, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.).

3. Васильева Т.В. Обзор сложившихся тенденций использования древесных отходов за рубежом // Лесн. вестн. 2002. № 4. С. 71–73.

Vasil'yeva T.V. The Review of Current Trends in the Use of Wood Waste Abroad // *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2002, no. 4, pp. 71–73. (In Russ.).

4. Гелес И.С. Древесная биомасса и основы экологически приемлемых технологий ее химико-механической переработки. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 382 с.

Geles I.S. *Wood Biomass and the Basics of Environment Friendly Technologies for its Chemical and Mechanical Processing*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2001. 382 p. (In Russ.).

5. Гелес И.С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 500 с.

Geles I.S. *Wood Raw Materials – the Strategic Basis and Reserve of Civilization*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2007. 500 p. (In Russ.).

6. Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. Петрозаводск, 1992. 201 с.  
Geles I.S., Korzhitskaya Z.A. *Wood Biomass and its Use*. Petrozavodsk, 1992. 201 p. (In Russ.).
7. Ефремов А.А., Первышина Г.Г. Комплексная схема переработки отходов растительного сырья // Химия растит. сырья. 2001. № 4. С. 123–124.  
Efremov A.A., Pervyshina G.G. Comprehensive Scheme for Processing Waste Plant Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 4, pp. 123–124. (In Russ.).
8. Журавлёва Л.Н., Девятловская А.Н. Основные направления использования древесных отходов // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2007. № 18. С. 96–99.  
Zhuravleva L.N., Devyatlovskaya A.N. The Main Directions of the Use of Wood Waste. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2007, no. 18, pp. 96–99. (In Russ.).
9. Иванов И.С. Развитие инновационных экотехнологий, базирующихся на использовании древесных отходов // Экономика и управление. 2009. № 12(50). С. 64–69.  
Ivanov I.S. Development of Innovative Eco-Technologies Based on the Use of Wood Waste. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*, 2009, no. 12, pp. 64–69. (In Russ.).
10. Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая переработка древесины / под ред. проф. И.Н. Ковернинского. Архангельск: АГТУ, 2003. 347 с.  
Koverninskiy I.N., Komarov V.I., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I., Sokolov O.M., Kutakova N.A., Selyanina L.I. *Complex Chemical Processing of Wood*. Ed. by prof. I.N. Koverninskiy. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2003. 347 p. (In Russ.).
11. Кузнецова С.А., Яценкова О.В., Данилов В.Г., Кузнецов Б.Н. Окислительная делигнификация древесины лиственницы в среде уксусная кислота – пероксид водорода – вода в присутствии катализатора  $H_2MoO_4$  // Химия растит. сырья. 2005. № 4. С. 35–39.  
Kuznetsova S.A., Yatsenkova O.V., Danilov V.G., Kuznetsov B.N. Oxidative Delignification of Larch Wood in the Acetic Acid – Hydrogen Peroxide – Water Medium in the Presence of  $H_2MoO_4$  Catalyst. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2005, no. 4, pp. 35–39. (In Russ.).
12. Патент № 2721503 РФ, МПК D21C 3/00. Способ получения полуцеллюлозы: № 2018140804: заявл. 19.11.2018: опубл. 19.05.2020 / Ф.Х. Хакимова, О.А. Носкова, Е.А. Глезман, В.А. Житнюк, М.Н. Спасенников; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т.  
Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Glezman E.A., Zhitnyuk V.A., Spasennikov M.N. Method for Producing Semi-Cellulose. Patent RF, no. RU 2721503, 2018. (In Russ.).
13. Пен Р.З., Бывшев А.В., Шапиро И.Л., Мирошниченко И.В., Тарабанько В.Е. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 8. Пероксидная варка и щелочная экстракция // Химия растит. сырья. 2001. № 3. С. 5–10.  
Pen R.Z., Byvshev A.V., Shapiro I.L., Miroshnichenko I.V., Taraban'ko V.E. Low-Temperature Oxidative Delignification of Wood. 8. Peroxide Pulping and Alkaline Extraction. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 3, pp. 5–10. (In Russ.).
14. Пен Р.З., Бывшев А.В., Шапиро И.Л., Мирошниченко И.В., Тарабанько В.Е. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 9. Пероксидная варка древесины разных пород // Химия растит. сырья. 2001. № 3. С. 11–15.  
Pen R.Z., Byvshev A.V., Shapiro I.L., Miroshnichenko I.V., Taraban'ko V.E. Low-Temperature Oxidative Delignification of Wood. 9. Peroxide Pulping of Different Wood Species. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 3, pp. 11–15. (In Russ.).
15. Пен Р.З., Рязанова Т.В. Комплексная химическая переработка древесины. Введение в специальность. Красноярск: СибГТУ, 2012. 158 с.  
Pen R.Z., Ryazanova T.V. *Complex Chemical Processing of Wood. Introduction to the Specialty*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2012. 158 p. (In Russ.).



16. Полюттов А.А., Пен Р.З., Бывшев А.В. Технология целлюлозы. Экологически чистое производство: моногр. Красноярск: Краснояр. писатель, 2012. 294 с.  
Polyutov A.A., Pen R.Z., Byvshv A.V. *Cellulose Technology. Environmentally Friendly Production*: Monograph. Krasnoyarsk, Krasnoyarski Pisatel Publ., 2012. 294 p. (In Russ.).
17. Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., Хабибуллин И.Г., Зиятдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 21. С. 90–93.  
Safin R.G., Sattarova Z.G., Khabibullin I.G., Ziatdinov R.R., Stepanova T.O. Modern Trends in Forest Resources Processing. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2015, vol. 18, no. 21, pp. 90–93. (In Russ.).
18. Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. материалы: в 3 т. Т. III. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. Ч. 3. Наилучшие доступные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности. СПб.: Политехника, 2012. 294 с.  
*Technology of Pulp and Paper Production: Reference Materials: in 3 vols. Vol. III. Automation, Standardization, Economics and Environmental Protection in Pulp and Paper Production. Part 3. Best Available Technologies in the Pulp and Paper Industry*. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2012. 294 p. (In Russ.).
19. Фирсов А.И. Использование древесных отходов при очистке лесохимических стоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 2-3. С. 116–123.  
Firsov A.I. Use of Wood Wastes for Treatment of Effluents of Forest-Chemical Industry. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 2-3, pp. 116–123. (In Russ.).
20. Хахимов Р.Х., Хахимова Ф.Х., Ковтун Т.Н. Применение аэродинамического диспергатора при подготовке макулатуры для использования в композициях бумаги и картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 3. С. 121–128.  
Khakimov R.Kh., Khakimova F.Kh., Kovtun T.N. Preparing of Wastepaper by Aerodynamic Disintegrator for Using in Paper and Board Composition. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 3, pp. 121–128. (In Russ.).
21. Хахимова Ф.Х., Носкова О.А. Отходы лесозаготовок – сырье для волокнистых полуфабрикатов производства картона // Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология. 2017. № 3. С. 128–143.  
Khakimova F.Kh., Noskova O.A. Waste from Logging of Trees as a Raw Material for Fibrous Semi-Finished Products for Cardboard Production. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* = Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology, 2017, no. 3, pp. 128–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2017.3.11>
22. Хахимова Ф.Х., Носкова О.А., Шевелева С.А., Хахимов Р.Р. Утилизация отходов лесозаготовок с получением полуфабриката для картона // Вестн. ПНИПУ. Приклад. экология. Урбанистика. 2018. № 2(30). С. 60–73.  
Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Sheveleva S.A., Khakimov R.R. Recycling of Logging Waste to Produce Semi-Finished Material for Cardboard. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Priklandaya ekologiya. Urbanistika* = Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics, 2018, no. 2, pp. 60–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.02.05>
23. Abu Bakar N.H., Salim N. Challenges and Opportunities in Wood Waste Utilization. *Wood Waste Management and Products. Sustainable Materials and Technology*. Singapore, Springer, 2023, chapt. 1, pp. 1–13. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1905-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1905-5_1)

24. Ämmälä A., Laitinen O., Sirviö J.A., Liimatainen H. Key Role of Mild Sulfonation of Pine Sawdust in the Production of Lignin Containing Microfibrillated Cellulose by Ultrafine Wet Grinding. *Industrial Crops & Products*, 2019, vol. 140, art. no. 111664. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111664>

25. Olszewski A., Kosmela P., Piszczyk Ł. A Novel Approach in Wood Waste Utilization for Manufacturing of Catalyst-Free Polyurethane-Wood Composites (PU-WC). *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, vol. 36, art. no. e00619. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00619>

26. Olaiya B.C., Lawan M.M., Olonade K.A. Utilization of Sawdust Composites in Construction = a Review. *Discover Applied Sciences*, 2023, vol. 5, art. no. 140. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05361-4>

27. Sirviö J.A., Isokoski E., Kantola A.M., Komulainen S., Ämmälä A. Mechanochemical and Thermal Succinylation of Softwood Sawdust in Presence of Deep Eutectic Solvent to Produce Lignin-Containing Wood Nanofibers. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 6681–6898. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03973-w>

**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\*182.21\*614.841.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-203-214

## Структурные особенности коренных сосняков северной и средней тайги при пирогенных воздействиях

*В.Г. Стороженко, д-р биол. наук; ResearcherID: [J-1460-2016](https://orcid.org/0000-0002-7254-9161).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7254-9161>*

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл., Россия, 143030; root@ilan.ras.ru, lesoved@mail.ru

*Поступила в редакцию 21.03.22 / Одобрена после рецензирования 27.06.22 / Принята к печати 29.06.22*

**Аннотация.** Изучение коренных сосновых лесов эволюционного формирования как исчезающих девственных лесов является основой фундаментальных исследований процессов образования устойчивых лесных сообществ. Цель представленного в статье исследования – сравнительная оценка структур древесных фракций фитоценозов по параметрам возрастных рядов древостоев и сукцессионному положению, динамическим показателям древесного отпада, влиянию пирогенного фактора, присутствию гнилевых повреждений древостоев. Возрастные структуры, числовые и линейные параметры пирогенных факторов, их воздействие на пораженность деревьев гнилями, объемные показатели древесного отпада и характеристики естественного возобновления, масса продуктов ксилолиза древесины при ее разложении дереворазрушающими грибами изучены в сосновых биогеоценозах с различными динамическими характеристиками в таежной зоне Европейской России. Сосновые биогеоценозы в этих условиях имеют разновозрастные структуры, измененные пожарами разных типов. На примере коренного сосняка в Печоро-Ильчском заповеднике (средняя тайга) показано влияние пирогенного воздействия на формирование гнилей разных типов и повреждений стволов. Объемы древесного отпада распределены по стадиям разложения в сосняках с неодинаковыми структурными и динамическими характеристиками; подрост сосны – по грациям высоты. Приведен пример расчета массы депонированных в древостоях и выделяющихся при разложении древесного отпада компонентов древесины дереворазрушающими грибами для биогеоценоза Печоро-Ильчского заповедника. Коренные сосновые леса северных территорий в большинстве пройдены пожарами разной интенсивности и типов, иногда по несколько раз за цикл развития. Пирогенные воздействия оказывают существенное влияние на изменение возрастных структур сосняков, поврежденность их стволов, общую пораженность древостоев дереворазрушающими грибами биотрофного комплекса, объемы древесного отпада, формирование структур естественного возобновления.

**Ключевые слова:** коренные сосновые леса, возрастная структура, древесный отпад, естественное возобновление, пирогенный фактор, ксилолиз древесины

*Для цитирования:* Стороженко В.Г. Структурные особенности коренных сосняков северной и средней тайги при пирогенных воздействиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 203–214. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-203-214>

Original article

## Structural Features of the Indigenous Pine Forests of the Northern and Middle Taiga under Pyrogenic Influences

*Vladimir G. Storozhenko*, Doctor of Biology; ResearcherID: [J-1460-2016](https://orcid.org/0000-0002-7254-9161).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7254-9161>

Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; root@ilan.ras.ru, lesoved@mail.ru

Received on March 21, 2022 / Approved after reviewing on June 27, 2022 / Accepted on June 29, 2022

**Abstract.** The study of indigenous pine forests of evolutionary formation as endangered virgin forests is the basic for fundamental research into the processes of formation of sustainable forest communities. The aim of the study presented in the article is a comparative assessment of the structures of tree fractions of phytocenoses according to the parameters of the age series of stands and the successional position, dynamic indicators of woody waste, the influence of the pyrogenic factor, and the presence of rot damage to the stands. Age structures, numerical and linear parameters of pyrogenic factors, their impact on the infestation of trees with rot, volumetric indicators of wood waste and characteristics of natural regeneration, the mass of wood xylolysis products during its decomposition by wood-destroying fungi have been studied in pine biogeocenoses with various dynamic characteristics in the taiga zone of European Russia. Pine biogeocenoses under these conditions have structures of different ages, altered by fires of different types. Using the example of an indigenous pine forest in the Pechora-Ilychskiy Nature Reserve (middle taiga), the influence of pyrogenic effects on the formation of various types of rot and damage to trunks is shown. The volumes of woody waste are distributed according to the stages of decomposition in pine forests with different structural and dynamic characteristics; pine undergrowth – according to height gradations. An example is given of calculating the mass of wood components deposited in the stands and released during the decomposition of woody waste by wood-destroying fungi for the biogeocenosis of the Pechora-Ilychskiy Nature Reserve. The majority of indigenous pine forests in the northern territories have been affected by fires of varying intensity and types, sometimes several times during a development cycle. Pyrogenic effects have a significant on changes in the age structures of pine forests, damage to their trunks, the general infestation of forest stands by wood-destroying fungi of the biotrophic complex, the volumes of woody waste, and the formation of natural regeneration structures.

**Keywords:** indigenous pine forests, age structure, woody waste, natural regeneration, pyrogenic factor, wood xylolysis

**For citation:** Storozhenko V.G. Structural Features of the Indigenous Pine Forests of the Northern and Middle Taiga under Pyrogenic Influences. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 203–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-203-214>



### *Введение*

Коренные разновозрастные сосновые леса европейской тайги России, не затронутые антропогенным воздействием, рассматриваются как исчезающие формации устойчивых девственных лесных сообществ эволюционного развития [4, 12]. Изучение законов формирования таких лесов является основой фундаментальных научных исследований в лесоведении, лесоводстве и других лесных науках. С этих позиций актуальными направлениями исследований можно признать: изучение в условиях пирогенных воздействий структуры и динамики формирования коренных девственных, не затронутых антропогенными изменениями, разновозрастных сосняков таежной зоны как универсальных эталонов устойчивости лесов одной из главных лесообразующих пород Севера; определение физических параметров коренных сосновых лесов по возрастным, горизонтальным, возобновительным характеристикам структур фитоценозов, древесного опада и грибных дереворазрушающих комплексов.

Изучению сосновых лесов посвящены многочисленные работы как отечественных, так и зарубежных авторов, почти на всех континентах планеты [14–19]. В европейской части России наиболее выдающиеся исследования проведены в научных центрах севера: в Карелии, Архангельской, Вологодской и Ленинградской областях, Республике Коми и других регионах [1, 2, 4, 6–10, 12, 14].

Цель исследования – сравнительная оценка структур древесных фракций фитоценозов по параметрам возрастных рядов древостоев и сукцессионному положению, динамическим показателям древесного опада, влиянию пирогенного фактора, присутствию гнилей древостоев.

### *Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования приняты коренные разновозрастные, не затронутые антропогенным влиянием сосновые биогеоценозы различной производительности и структурных характеристик в северной и южной частях подзоны северной тайги: 1 – в Усть-Цилемском лесничестве Республики Коми (65°26'02" с. ш. 52°09'03" в. д.); 2 – в Национальном парке «Паанаярви» (66°09'45" с. ш. 30°32'37" в. д.); 3 – в Кандалакшском лесничестве Мурманской области (66°94'78" с. ш. 31°60'74" в. д.); 4 – в Национальном парке «Югыд ва» (63°940'461" с. ш. 57°585'186" в. д.); а также в средней тайге: 5, 6 – в Национальном парке «Водлозерский» (62°30'0" с. ш. 36°55'0" в. д.); 7 – в резервате «Ащозерский» (60°16'43" с. ш. 34°42'27" в. д.) Ленинградской области; 8 – в Печоро-Илычском заповеднике Республики Коми (62°34'30" с. ш. 58°15'30" в. д.).

На пробных площадях (ПП), заложенных на каждой из 8 изученных территорий, учитывались лесоводственные характеристики биогеоценозов, проводились сплошная нумерация и картирование расположения деревьев, бурение возрастным буром Пресслера у шейки корня с определением их возрастов, стадий развития и вида гнилей – коррозионные или деструктивные [12]. Устанавливались линейные и качественные параметры признаков пиро-

генных воздействий на стволах, их связь с присутствием гнилей стволов. Учитывалось естественное возобновление всех пород по категориям высоты через 0,5 м. Древесный отпад распределялся по виду (ветровал, бурелом), степени разложения, породе, диаметру стволов [12]. В камеральный период строились возрастные ряды биогеоценозов с распределением деревьев по возрастным поколениям, фиксировалось их динамическое сукцессионное положение [2, 4, 12]. Находились объемы стволов древесного отпада с применением разрядов высот по таблицам объемов деревьев [13]. Запасы древостоев и объемы древесного отпада переводились в фитомассу по конверсионным коэффициентам [5]. По формулам микогенного ксилолиза древесины [11] определялась масса депонированных в стволах живых деревьев и выделяющихся при разложении древесного отпада компонентов древесины – С, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O – и количество энергии (Q, кДж/г):

$$100 \text{ частей древесины} + 138,4 (\text{O}_2) = 182,6 (\text{CO}_2) + 55,8 (\text{H}_2\text{O}) + 19,89Q.$$

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Краткая лесоводственная характеристика принятых для анализа коренных разновозрастных сосновых биогеоценозов представлена в табл. 1.

Сосновые биогеоценозы, данные о которых представлены в табл. 1, на европейской части России расположены между 66 и 62° с. ш., что относит их к ельникам северной и средней подзон тайги. Все они имеют разновозрастные структуры, измененные пожарами, некоторые – по несколько раз за свою жизнь. Только в одном из 8 выделенных для анализа сосняков не обнаружено признаков пирогенного воздействия – ПП 1. Преимущественная группа типов леса для всех биогеоценозов – брусничная с постоянным присутствием черники.

Отобранные для анализа древостои имеют относительно незначительные запасы стволовой древесины, полноты, что характерно для коренных девственных сосняков, произрастающих в основном на мелких песчаных, галечно-песчаных моренных почвах, иногда с выходами скальных пород.

Возрастные и динамические показатели изучаемых сосновых биогеоценозов, отраженные в табл. 2, в большинстве подчинены общей для коренных лесных сообществ тенденции к формированию наиболее устойчивых структур древостоев как основного накопителя биомассы лесов любых формаций, в т. ч. и сосновых. По данным И.И. Гусева, устойчивые леса, к которым в наибольшей степени относятся биогеоценозы климаксовых фаз динамики, должны иметь один эксцесс максимума объемов деревьев в середине возрастного ряда [2]. Близок к этой позиции и С.А. Дыренков [4]. Динамическое положение биогеоценозов (табл. 2) описано с позиций И.И. Гусева [2]. Проведенные нами многолетние исследования структур коренных лесов в различных лесных зонах Европейской России показывают, что климаксовой фазе динамики как конечному, наиболее устойчивому сукцессионному положению лесного сообщества в его онтогенезе соответствует более равномерное распределение деревьев в возрастных поколениях по всему возрастному ряду.

Таблица 1

Лесоводственные характеристики сосновых биогеоценозов северных территорий Европейской России  
The silvicultural characteristics of pine biogeocenoses in the northern territories of European Russia

ПП	Состав древостоя	Запас, м <sup>3</sup> /га	Признаки пионерного воздействия	Тип леса	Полнота	Бонитет	Состав		
							подроста	подлеска	напочвенного покрова
1	6С4Е+Б	68,0	Нет	С бр.-вод.-баг.-лиш.	0,4	V	Б <sup>кар</sup> , Б <sup>пуш</sup>	Бр., баг., мор., яг.	
2	10С	165,1	Есть	С бр.-чрр.-баг.	0,5	IV	РБ, Мж	Бр., чрр., баг., мхи, лиш.	
3	10С+Е	96,8					Б, Мж		
4	8С2Е+Кл, Б	66,2	Есть	С бр.-чрр.-баг.-мш.	0,6	V	Б, Мж, СтЛ <sup>кл</sup>	Чрр., бр., баг., мхи	
5	10С+Е	256,3					Б, Мж, РБ		
6	10С	162,2	Есть	С бр.-чрр.	0,5	III	Б	Бр., чрр., мхи, пап.	
7	10С+Е	193,6					Мж, РБ		
8	10С+Лц, Е	148,2					Б, Мж		

Примечание: Бр. – брусничный; вод. – водяничковый; лиш. – лишайниковый; лиш. – лишайниковый; чрр. – черничный; мш. – мшистый; Б<sup>кар</sup> – береза карликовая; Б<sup>пуш</sup> – береза пушистая; Мж – можжевельник; пап. – папоротник; СтЛ<sup>кл</sup> – кедровый стланик; яг. – ягель.

Таблица 2

Возрастные и динамические характеристики исследованных сосновых биогеоценозов  
The age and dynamic characteristics of the studied pine biogeocenoses

ПП	Запас, м <sup>3</sup> /га	Распределение, м <sup>3</sup> /га, деревьев по возрастным поколениям, лет												Фаза динамики	
		До 40	41–80	81–120	121–160	161–200	201–240	241–280	281–320	321–360	361–400	401 и более			
1	68,0	12,2	17,0	7,5	13,6	11,6	6,1	–	–	–	–	–	–	–	Дн
2	165,1	1,2	14,3	35,1	6,8	57,4	41,4	8,9	–	–	–	–	–	–	
3	96,8	3,9	3,3	3,3	7,9	12,8	5,6	17,8	8,2	13,4	20,6	–	–	–	Кл
4	66,2	2,6	4,4	12,5	35,7	5,3	5,7	–	–	–	–	–	–	–	
5	256,3	2,3	14,8	175,3	40,7	8,8	7,0	–	7,4	–	–	–	–	–	Дн
6	162,2	4,7	21,2	17,6	58,2	30,9	6,2	7,3	16,1	–	–	–	–	–	
7	193,6	23,2	1,9	31,4	41,0	56,2	15,4	9,2	15,3	–	–	–	–	–	
8	148,2	1,2	6,4	1,2	–	–	–	2,2	14,6	122,6	–	–	–	–	

Примечание: Кл – климакс; Дн – промежуточная динамика.

Анализируя структуру возрастных рядов биогеоценозов с позиций И.И. Гусева [2], можно видеть соответствие обозначенным тенденциям только у двух сообществ: ПП 4 в северной тайге и ПП 5 – в средней. Менее соответствует биогеоценоз ПП 6, еще меньше – ПП 2 и 7, и совсем не соответствуют биогеоценозы ПП 1, 3, 8. Как находящийся в состоянии климакса, по нашей трактовке, нельзя охарактеризовать ни один из рассмотренных биогеоценозов. Биогеоценозы с обозначением «промежуточная динамика» рассматриваются нами как сообщества, не в полной мере соответствующие принятым фазам динамики – климакс, демутация, дигрессия, – а находящиеся в промежуточных динамических положениях.

Изучение связи возраста и запаса древостоя в возрастных поколениях сосновых биогеоценозов, относящихся, по трактовке И.И. Гусева, к климаксовым сообществам, с применением уравнений корреляционных отношений по линейным и экспоненциальным приближениям выявило отсутствие существенной связи по обоим из них, в то время как показатели связи этих предикторов при климаксовых фазах динамики должны стремиться к 1 (рис. 1).

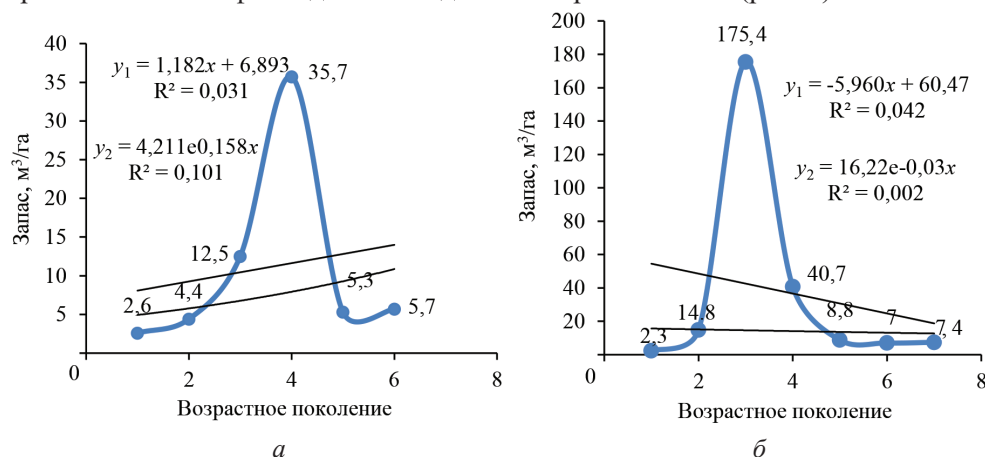


Рис. 1. Теснота связи возраста и запаса древостоя в возрастных поколениях (1-е – 40 лет; 8-е – 360 лет) сосняков: а – ПП 4; б – ПП 5 ( $y_1$  – линейное приближение;  $y_2$  – экспоненциальное приближение)

Fig. 1. The closeness of the relationship between the age and stand stock in age generations (the 1st generation – 40 years old, the 8th generation – 360 years old) of the age series of pine forests: а – SP 4; б – SP 5 ( $y_1$  – linear approximation;  $y_2$  – exponential approximation)

Можно предположить, что в значительной степени на дестабилизацию структур возрастных рядов сосняков влияют пирогенные воздействия: низовые пожары, уничтожающие подрост и подстилку вместе с запасом семян, нарушающие естественную смену возрастных поколений, и комбинированные, являющиеся причиной гибели части деревьев из более молодых возрастных поколений, подрост, подгона с более тонкой корой и подгаров коры и древесины стволов на значительные высоты. Показательным в подтверждении воздействия пирогенного фактора на изменение структур сосняков является биогеоценоз ПП 8, располагающийся на высоком плато р. Печоры предгорий Урала. Биогеоценоз был пройден комбинированными пожарами 3 раза за период в 120 лет. По анализу каллюсов, образовавшихся по краям незарастающих подгаров, и отсутствию подгаров на молодых соснах можно сделать вывод, что последний пожар прошел примерно 90–100 лет назад. Подгары стволов до древесины фиксирова-



лись в 68 % случаев, из которых в 7 % образовались дупла. Общая пораженность биогеоценоза грибами дереворазрушающего комплекса составляет 40 % от числа всех деревьев и трактуется как очень высокая. Числовые показатели результатов пирогенного воздействия на коренной сосновый биогеоценоз ПП 8 (квартал 898, выдел 25, Печоро-Илычский заповедник) следующие: запас – 148,2 м<sup>3</sup>/га; количество деревьев – 146 дер./га; количество деревьев с гнилями – 45,5 % коррозийных и 54,5 % деструктивных; пораженность древостоя – 40 %; присутствие подгаров на стволах зафиксировано у 68 % и не отмечено у 32 %; доля деревьев с подгарами по высоте стволов (м): до 0,5 – 36 % от общего с подгарами; 0,6–1,0 – 13 %; 1,1–1,5 – 19 %; 1,6–2,0 – 15 %; 2,1–2,5 – 5 %; 2,6–3,0 – 5 %; 3,1 и более – 7 %. Именно гнили способствуют повышенным объемам вывалов деревьев, особенно первых поколений и их переходу в структуру валежа.

Кроме пирогенного воздействия на показатели пораженности древостоя ПП 8 дереворазрушающими грибами влияют предельные возраста деревьев 1-го поколения, достигающие 440 лет. По динамическим показателям биогеоценоз относится к дигрессивной фазе.

Принято, что пирогенные воздействия в определенной степени могут влиять на выбывание деревьев из состава древостоев в структуру древесного отпада, валежа. В табл. 3 приведены показатели древесного отпада в древостоях изучаемых биогеоценозов.

Наиболее устойчивые лесные сообщества климаксовой фазы динамики в своем развитии формируют не только относительно равномерные объемы деревьев в возрастных рядах, но и такие же относительно равномерные объемы древесного отпада по стадиям разложения в структурах валежа [12].

Таблица 3

**Объемы древесного отпада в исследованных сосновых биогеоценозах**  
**The volumes of dead wood in the studied pine biogeocenoses**

ПП	Запас древостоя, м <sup>3</sup> /га	Объем валежа, м <sup>3</sup> /га	Доля валежа от запаса, %	Распределение валежа по стадиям разложения, м <sup>3</sup> /га					Фаза динамики
				1-я (1–5)	2-я (6–25)	3-я (26–35)	4-я (36–45)	5-я (50–60)	
1	68,0	8,2	12,1	–	1,8	3,6	1,4	1,4	Дн
2	165,1	15,1	9,1	0,4	1,7	9,3	0,8	2,9	
3	96,8	7,2	13,4	0,4	1,1	1,3	1,5	2,9	Кл
4	66,2	23,6	35,6	0,8	7,2	1,6	11,4	2,6	Дн
5	256,3	54,1	21,1	6,5	15,0	12,0	13,3	7,3	Кл
6	162,2	12,7	7,8	–	1,6	0,5	7,8	2,8	Дн
7	193,6	31,4	16,2	1,3	3,8	9,1	5,3	11,9	
8	148,2	43,5	29,4	4,0	13,3	10,2	1,3	4,7	

Примечание: Подробное описание стадий разложения для хвойных пород северной тайги приведено в статьях и монографиях В.Г. Стороженко [12]. В скобках приведены ориентировочные временные периоды (лет) стадий разложения для валежа ели и сосны северной тайги.

Этим условиям с некоторым приближением может соответствовать биогеоценоз ПП 5, который, по версии И.И. Гусева [2], рассматривается как климаксовое сообщество (рис. 2, б). По нашей версии, наиболее приближен к состоянию климакса биогеоценоз ПП 3 (рис. 2, а).

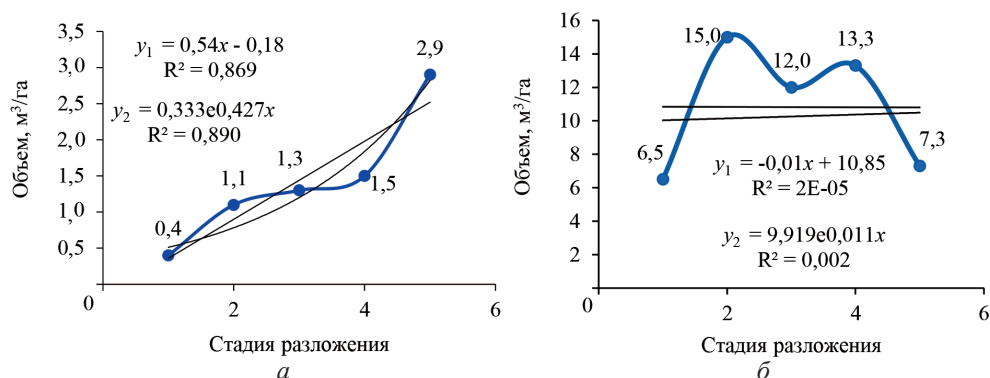


Рис. 2. Теснота связи стадии разложения и объема валежа в различных по структуре биogeоценозах: а – ПП 3; б – ПП 5

Fig. 2. The closeness of the relationship between decomposition stage and the volume of dead wood in biogeocenoses of different structures: а – SP 3; б – SP 5

Для линейного и экспоненциального приближений величин искомым предикторов древостоя ПП 3, с постепенным равномерным увеличением объемов валежа от минимальных к максимальным значениям, уравнения связи  $y_1$  и  $y_2$  обнаруживают высокие показатели корреляционного отношения  $R^2 = 0,869$  и  $0,890$  – связь тесная [3]. Для древостоя ПП 5 те же показатели, но с неравномерным распределением объемов валежа по стадиям разложения констатируют отсутствие даже незначительной связи (рис. 2, б). Эта закономерность наблюдается также при статистической обработке показателей связи возраста и объемов деревьев в возрастных рядах древостоев. По данной закономерности возможно дать сукцессионную характеристику биogeоценозов – климаксовые, дигрессивные, демутационные: чем равномернее увеличение объемов валежа в поколениях возрастного ряда, тем ближе биogeоценоз к состоянию климакса или наоборот.

По результатам анализа структур сосняков в целом можно констатировать, что пирогенные воздействия в значительной степени изменяют возрастные структуры коренных сосняков, приводят к появлению гнилей стволов и повышенным объемам древесного отпада в структурах валежа.

Пирогенные воздействия любых типов, но в особенности низовые пожары, сопровождаются практически полным уничтожением естественного возобновления на всей площади, пройденной огнем, кардинально меняя возрастную структуру биogeоценозов. При этом из структуры возрастных рядов одновременно выпадает, как правило, 2 возрастных поколения. Кроме того, уничтожается запас семян в подстилке и верхнем горизонте почвы. Тем не менее уже на следующий год после пожара площади могут обсемениться новым урожаем семян от оставшихся на корню живых деревьев, появляются всходы новых поколений леса, достаточные для формирования последующих поколений деревьев – биogeоценозы ПП 3–8. В перспективе последствия пожара могут сказаться на уменьшении количества деревьев в определенных поколениях возрастных рядов – биogeоценоз ПП 2.

Общее количество подроста сосны (шт.) в изучаемых биogeоценозах: для ПП 1 – 900; 2 – 30; 3 – 1483; 4 – 789; 5 – 4252; 6 – 3519; 7 – 3000; 8 – 10 710. На рис. 3 приведена диаграмма распределения подроста по грациям высоты через 0,5 м в данных биogeоценозах.

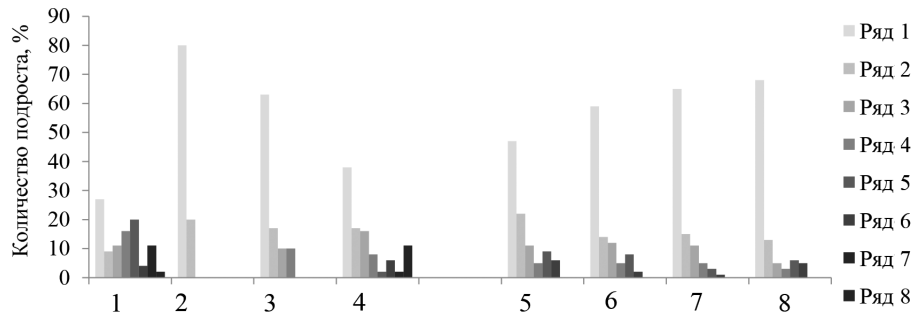


Рис. 3. Распределение подроста сосны в биогееценозах ПП 1–8 по градациям высоты: ряд 1 – до 0,5 м; ряд 2 – до 1,0 м; ряд 3 – до 1,5 м; ряд 4 – до 2,0 м; ряд 5 – до 2,5 м; ряд 6 – до 3,0 м; ряд 7 – до 3,5 м; ряд 8 – до 4,0 м

Fig. 3. The distribution of pine undergrowth in the biogeocenoses of SPs 1–8 by height gradations: row 1 – up to 0.5 m; row 2 – up to 1.0 m; row 3 – up to 1.5 m; row 4 – up to 2.0 m; row 5 – up to 2.5 m; row 6 – up to 3.0 m; row 7 – up to 3.5 m; row 8 – up to 4.0 m

Как общая закономерность, наибольшее количество подроста имеет высоту до 0,5 м с постепенным снижением количества к высоте 4 м с диаметрами на высоте груди, приближающимися к пересчетным величинам древостоя. Можно отметить, что в биогееценозе ПП 2 зафиксирован подрост только двух градаций – до высоты 1 м. Именно в нем последний пожар произошел около 20 лет назад.

Определенный интерес представляют данные о массе депонированных в древостоях фитогенозов и выделяющихся компонентов древесины при ее разложении дереворазрушающими грибами. В табл. 4 приведен пример такого расчета для биогееценоза ПП 5 по формуле микогенного ксилолиза, предложенной В.А. Соловьевым. С помощью этой формулы рассчитывается масса продуктов ксилолиза древесины в основном дереворазрушающими грибами [11].

Таблица 4

**Фитомасса древостоя и масса депонированных в нем продуктов ксилолиза для биогееценоза ПП 5 (запас древостоя, включая валеж, 256,3 м<sup>3</sup>/га)**

**The phytomass of the stand and the mass of xylolysis products deposited in it for the biogeocenosis of SP 5 (the stand stock, including dead wood, is 256.3 m<sup>3</sup>/ha)**

Часть фитомассы	Запас фитомассы, т/га	Масса компонентов древесины, т/га				Q, · 10 <sup>6</sup> , кДж/г
		C	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	
Живая	165,5	82,6	229,1	302,2	92,3	32,9
Валеж всего	34,9	17,4	48,3	63,7	19,5	6,9
В т. ч.:						
1-я стадия	4,2	2,1	5,8	7,7	2,3	0,8
2-я стадия	9,7	4,8	13,4	17,7	5,4	1,9
3-я стадия	7,7	3,8	10,7	14,1	4,3	1,5
4-я стадия	8,6	4,3	11,9	15,7	4,8	1,7
5-я стадия	4,7	2,3	6,5	8,6	2,6	0,9

По такому же алгоритму могут быть рассчитаны объемные показатели древесных фракций и компонентов древесины биогеоценозов любых лесоводственных и динамических характеристик, в т. ч. и биогеоценозов эталонного статуса, для сравнения с другими лесами.

#### Заключение

Сосновые леса северных территорий по большей части пройдены пожарами разной интенсивности и типов, иногда по несколько раз за цикл развития. Пирогенные воздействия оказывают существенное влияние на возрастные структуры сосняков, меняя естественный ход формирования возрастных рядов и, соответственно, фазовое положение в сукцессионной динамике сосновых биогеоценозов.

В коренных разновозрастных сосняках высоких возрастов первых поколений повторяющиеся в течение их генезиса пожары вызывают поражение деревьев грибами дереворазрушающего биотрофного комплекса, обуславливающее гнилевые фауны, в отдельных примерах – до 50 % и более, часто с образованием незарастающих сухобочин и дупел.

Статистический анализ показал отсутствие связи возраста и объемов деревьев в возрастных поколениях сосняков с нарушенными пожарами возрастными структурами древостоев – корреляционное отношение ( $R^2$ ) при линейном и экспоненциальном приближениях составляет от 0,001 до 0,1.

Анализ связи объема валежа с его присутствием в грациях стадий разложения выявил различные значения корреляционного отношения  $R^2$ . Постепенное равномерное увеличение объема валежа (и наоборот) показывает высокие значения связи и корреляционного отношения  $R^2 = 0,890$  – связь тесная как при линейном, так и при экспоненциальном приближениях.

Низовые пожары уничтожают подрост и запас семян в подстилке, нарушая возобновительный процесс, который, однако, восстанавливается в последующие годы обсеменением от сохранившихся деревьев.

Алгоритм расчета депонированных в древостое компонентов древесины по формуле микогенного ксиллиза В.А. Соловьева может быть использован для получения сравнительных показателей биогеоценозов с различными лесоводственными и динамическими характеристиками при исследованиях пулов и потоков углерода, двуокиси углерода, воды и накопления энергии в лесах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бахтин А.А., Соколов Н.Н. Типы возрастной структуры заболоченных сосняков Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 4. С. 76–86.

Bakhtin A.A., Sokolov N.N. Types of Age Structure of Waterlogged Pine Forests in the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 4, pp. 76–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.4.76>

2. Гусев И.И. Строение и особенности таксации ельников Севера. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 76 с.

Gusev I.I. *The Structure and Features of Taxation of Spruce Forests of the North*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 76 p. (In Russ.).

3. Дворецкий М.Л. Пособие по вариационной статистике. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 104 с.

Dvoretzky M.L. *A Manual on Variation Statistics*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ, 1971. 104 p. (In Russ.).

4. Дыренков С.А. Структура и динамика таежных ельников. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1984. 176 с.

Dyrenkov S.A. *The Structure and Dynamics of Taiga Spruce Forests*. Leningrad, Nauka Publ. (Leningrad department), 1984. 176 p. (In Russ.).

5. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесообразующих пород России // Лесн. таксация и лесоустройство. 2003. № 1(32). С. 119–127.

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V. Conversion Rates of Planting Stocks into Phytomass of the Main Forest-Forming Species in Russia. *Lesnaya taksatsiya i lesoustrojstvo*, 2003, no. 1(32), pp. 119–127. (In Russ.).

6. Кутявин И.Н. Сосновые леса Северного Приуралья: строение, рост, продуктивность. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2018. 176 с.

Kutyavin I.N. *Pine Forests of the Northern Cis-Urals: Structure, Growth, Productivity*. Syktvykar, IB FRC Komi SC UB RAS Publ., 2018. 176 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.31140/book-2018-02>

7. Кутявин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Кузнецов М.А. Строение древостоев северотаежных сосняков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 86–105.

Kutyavin I.N., Manov A.V., Osipov A.F., Kuznetsov M.A. Stand Structure of Northern Taiga Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 2, pp. 86–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-86-105>

8. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Гослестехиздат, 1948. 127 с.

Melekhov I.S. *The impact of Fires on Forests*. Moscow, Leningrad, Gosllestekhzidat Publ., 1948. 127 p. (In Russ.).

9. Соболев А.Н., Феклистов П.А. Особенности строения сосновых древостоев на острове Большом Соловецком // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 77–87.

Sobolev A.N., Feklistov P.A. Features of the Structure of Pine Forest Stands on Bolshoy Solovetsky Island. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 77–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-77-87>

10. Соколов Н.Н. Возрастное строение сосняков Архангельской области // Лесовосстановление и формирование древостоев на Европейском Севере: сб. ст. / отв. ред. П.Н. Львов. Архангельск, 1969. (Тр. Арханг. лесотехн. ин-та им. В.В. Куйбышева; Вып. 21). С. 56–60.

Sokolov N.N. Age Structure of Pine Forests of the Arkhangelsk Region. *Reforestation and Formation of Tree Stands in the European North: Collection of Articles*. Ed.-in-chief P.N. L'vov. *Proceedings of the Arkhangelsk Forestry Institute named after V.V. Kujbyshev*, 1969, iss. 21, pp. 56–60. (In Russ.).

11. Соловьев В.А. Микогенный ксилолиз, его экологическое и технологическое значение // Научные основы устойчивости лесов к дереворазрушающим грибам / отв. ред. С.Э. Вомперский. М.: Наука, 1992. С. 140–171.

Solov'yev V.A. Mycogenic Xylolysis, its Environmental and Technological Significance. *The Scientific Basis of Forest Resistance to Wood-decaying Fungi*. Moscow, Nauka Publ., 1992, pp. 140–171. (In Russ.).

12. Стороженко В.Г. Устойчивые лесные сообщества: (Теория и эксперимент). Тула: Гриф и К., 2007. 190 с.

Storozhenko V.G. *Sustainable Forest Communities: Theory and Experiment*. Moscow, Tula, Grif i K. Publ., 2007. 190 p. (In Russ.).

13. Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора: Таблицы для таксации леса. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 853 с.

Tret'yakov N.V., Gorskiy P.V., Samoylovich G.G. *Taxator's Handbook: Tables for Forest Taxation*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 853 p. (In Russ.).

14. Garet J., Raulier F., Pothier D., Cumming S.G. Forest Age Class Structures as Indicators of Sustainability in Boreal Forest: Are We Measuring Them Correctly? *Ecological Indicators*, 2012, vol. 23, pp. 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.032>

15. Kuuluvainen T., Mäki J., Karjalainen L., Lehtonen H. Tree Age Distributions in Old-Growth Forest Sites in Vienansalo Wilderness, Eastern Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, art. no. 556. <https://doi.org/10.14214/sf.556>

16. Liu Zh., Yang J., Chang Y., Weisberg P.J., He H.S. Spatial Patterns and Drivers of Fire Occurrence and its Future Trend under Climate Change in a Boreal Forest of Northeast China. *Global Change Biology*, 2012, vol. 18, iss. 6, pp. 2041–2056. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02649.x>

17. Rigo de D., Libertà G., Durrant T.H., Artés Vivancos T., San-Miguel-Ayanz J. *Forest Fire Danger Extremes in Europe under Climate Change: Variability and Uncertainty*. Luxembourg, Publication Office of the European Union, 2017. 71 p. <https://doi.org/10.2760/13180>

18. Steijlen I., Zackrisson O. Long-Term Regeneration Dynamics and Successional Trends in a Northern Swedish Coniferous Forest Stand. *Canadian Journal of Botany*, 1987, vol. 65, no. 5, pp. 839–848. <https://doi.org/10.1139/b87-114>

19. Río del M., Pretzsch H., Alberdi I., Bielak K., Bravo F., Brunner A., Condés S., Ducey M.J., Fonseca T., Lüpke von N., Pach M., Peric S., Perot T., Souidi Z., Spathelf P., Sterba H., Tijardovic M., Tomé M., Vallet P., Bravo-Oviedo A. Characterization of the Structure, Dynamics, and Productivity of Mixed-Species Stands: Review and Perspectives. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 23–49. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0927-6>

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