

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

2

2022

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

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

## **ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

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

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

# **Lesnoy Zhurnal**

## **(Russian Forestry Journal)**

**Scientific peer-reviewed journal**

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

2

2022

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

## **EDITORIAL BOARD:**

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

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

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



## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- Н.А. Прожерина, Е.Н. Наквасина.* Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России..... 9
- В.А. Брынцев, М.А. Лавренов, А.А. Коженкова.* Исследование морфологических признаков и посевных качеств семян видов рода *Larix* Mill. в условиях интродукции..... 26
- В.Г. Стороженко.* Особенности горизонтальной структуры лесов еловых формаций европейской тайги России..... 39
- N.R. Sungurova, I.A. Popkova.* Productivity of Pine Plantations during Reclamation of Sand Quarries..... 50
- С.Г. Биганова, Ю.И. Сухоруких, К.Н. Кулик, А.К. Кулик.* Морфологические показатели крон лещины в горных лесах..... 59
- B. Miletić, B. Drašković, T. Đorem, S. Bojić, B. Matović, D.B. Stojanović.* The Potential Impact of Climate Change on the Distribution of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) in Bosnia and Herzegovina..... 73
- С.А. Зотов, Е.В. Дмитриев, П.Г. Мельник, Т.В. Кондранин.* Повышение информативности мультиспектральных спутниковых изображений с использованием данных текстурного анализа..... 84
- А.С. Новосёлов.* Динамика выделения соснового терпентина в зависимости от макроструктурных показателей древесины на болотных почвах..... 105
- Е.Ю. Колмогорова, В.И. Уфимцев.* Почвенные характеристики эмбриоземов под покровом сосновых насаждений на техногенных элювиях Кузбасса..... 118

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- Р.Ю. Добрецов, С.Б. Добрецова, С.А. Войнаш, В.А. Соколова.* Математическая модель формирования глубины колеи лесной гусеничной машины..... 132
- А.М. Боргунтдинов, С.Е. Рудов, И.В. Григорьев, Д.С. Ефимов, В.В. Швецова.* Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожно-го покрытия магистральных лесовозных дорог..... 146

*МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ*

- А.Р. Бирман, А.А. Тамби, С.А. Угрюмов, П.Р. Гильванов.* Технология модификации древесины березы для создания нейтронозащитных материалов..... 159
- В.И. Мелехов, И.И. Соловьев, Н.Г. Пономарева.* Формирование коаксиальных полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы..... 170

*ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ*

- Н.А. Криницин, В.К. Дубовый, К.В. Полякова, И.Н. Ковернинский.* Исследование влияния вида связующего на свойства фильтровальных стекловолокнистых бумаг для очистки воздуха..... 178
- Ю.Г. Хабаров, А.Ю. Гаркотин, В.А. Вешняков.* Исследование нитрования сульфатного лигнина ацетилнитратом в апротонных растворителях..... 193
-



## CONTENTS

## FORESTRY

- N.A. Prozherina, E.N. Nakvasina.* Climate Change and Its Impact on Adaptation and Intraspecific Variability of Conifer Species of the European North of Russia..... 9
- V.A. Bryntsev, M.A. Lavrenov, A.A. Kozhenkova.* Studying Morphological Characteristics and Sowing Qualities of Seeds of Species of the Genus *Larix* Mill. in the Conditions of Introduction..... 26
- V.G. Storozhenko.* Features of the Horizontal Structure of Forests of Spruce Formations in the European Taiga of Russia..... 39
- N.R. Sungurova, I.A. Popkova.* Productivity of Pine Plantations during Reclamation of Sand Quarries..... 50
- S.G. Biganova, Yu.I. Sukhorukikh, K.N. Kulik, A.K. Kulik.* Morphological Characteristics of Hazel Crowns in Mountain Forests..... 59
- B. Miletić, B. Drašković, T. Đorem, S. Bojić, B. Matović, D.B. Stojanović.* The Potential Impact of Climate Change on the Distribution of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) in Bosnia and Herzegovina..... 73
- S.A. Zotov, E.V. Dmitriev, P.G. Melnik, T.V. Kondranin.* Increasing the Informativity of Multispectral Satellite Images Using Texture Analysis Data..... 84
- A.S. Novoselov.* Dynamics of Pine Turpentine Flow Depending on the Macrostructural Parameters of Wood on Swamped Soils..... 105
- E.Yu. Kolmogorova, V.I. Ufimtsev.* Soil Characteristics of Embryozems under Cover of Pine Plantations on Technogenic Residual Rocks of Kuzbass..... 118

## LOGGING TECHNOLOGIES

- R.Yu. Dobretsov, S.B. Dobretsova, S.A. Voinash, V.A. Sokolova.* Mathematical Model of the Track Depth Formation of a Forestry Tracked Vehicle..... 132
- A.M. Borgonutdinov, S.E. Rudov, I.V. Grigorev, D.S. Efimov, V.V. Shvetsova.* Experimental Studies of the Thermal Regime in the Pavement Layers of Long-Distance Forest Roads..... 146

## MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- A.R. Birman, A.A. Tambi, S.A. Ugryumov, P.R. Gilvanov.* Birch Wood Modification Technology for Creating Neutron Shielding Materials..... 159

- V.I. Melekhov, I.I. Solovov, N.G. Ponomareva.* Formation of Coaxial Fields of Residual Stresses in the Circular Saw Blade..... 170

*CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD*

- N.A. Krinitsin, V.K. Dubovy, K.V. Polyakova, I.N. Koverninsky.* Study of the Influence of Binder Type on the Properties of Glass Fiber Filter Paper for Air Purification..... 178
- Yu.G. Khabarov, A.Yu. Garkotin, V.A. Veshnyakov.* Study of Kraft Lignin Nitration with Acetyl Nitrate in the Presence of Aprotic Solvents..... 193
-



УДК 630\*11:630\*12

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25

## ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА АДАПТАЦИЮ И ВНУТРИВИДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХВОЙНЫХ ПОРОД ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ

*Н.А. Прожерина<sup>1</sup>, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [A-5917-2013](https://orcid.org/0000-0002-5067-7007),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-7007>*

*Е.Н. Наквасина<sup>2</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; Researcher ID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>*

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: pronad1@yandex.ru

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

**Обзорная статья** / Поступила в редакцию 19.04.21 / Принята к печати 19.07.21

**Аннотация.** Современные изменения климата влияют на леса и требуют разработки особой стратегии управления лесным хозяйством. Цель обзора – анализ влияния наблюдаемого и прогнозируемого изменения климата на адаптационную реакцию древесных пород с учетом их внутривидовой дифференциации для определения направлений исследований и выработки корректив ведения лесного хозяйства на Европейском Севере страны. Показано, что долгосрочные отклики в лесных экосистемах связаны не только с термическими сдвигами, но и со сменой режимов увлажнения, инсоляции, распространением патогенов и др. Изменения в лесных экосистемах могут сопровождаться физиологическими и генетическими мутациями у всех видов и быть растянуты по времени на несколько поколений. В связи с генетическими мутациями виды должны пройти «эволюционную адаптацию». При устойчивом потеплении и смене режима влажности воздуха и почв может повышаться продуктивность лесов за счет изменения продолжительности вегетационного периода и сроков вегетации, усиления фотосинтетической активности, с другой стороны – вероятно снижение производительности в результате уменьшения уровня осадков и возникновения засухи. Прогнозируются постепенные климатические изменения, и на обширной территории России в различных с точки зрения географии регионах степень проявления этих изменений будет неодинакова. У лесобразующих древесных пород проявятся краткосрочные отклики, связанные с географическим положением популяции и климатическими условиями, в которых сформировались данные растения за время стабильного климатического периода после расселения в голоцене. В то же время наследственно закрепленные показатели роста и развития откликнутся на смену климатических параметров, что будет определяться географическим положением лесобразующих пород и их популяционными особенностями. Дифференцированный отклик древесных пород необходимо учитывать при планировании лесохозяйственных мероприятий, адаптируя их к возможным климатическим изменениям.

**Для цитирования:** Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-14-50307.

**Ключевые слова:** изменение климата, хвойные породы, экологические факторы, фенотипическая пластичность, внутривидовая изменчивость, географические происхождения, Европейский Север России.

## CLIMATE CHANGE AND ITS IMPACT ON ADAPTATION AND INTRASPECIFIC VARIABILITY OF CONIFER SPECIES OF THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA

*Nadezhda A. Prozherina*<sup>1</sup>, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

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

*Elena N. Nakvasina*<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

<sup>1</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: pronad1@yandex.ru

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

---

Review article / Received on April 19, 2021 / Accepted on July 19, 2021

---

**Abstract.** Current climate change is affecting forests and requires a specific forest management strategy. The review aims to analyze the impact of observed and projected climate change on the tree species adaptation response with regard to their intraspecific differentiation to determine the potential for further research and develop forest management adjustments in the Russian European North. The article shows that long-term responses in forest ecosystems are related not only to thermal shifts, but also to changes in moisture regime, insolation, distribution of pathogens, etc. Changes in forest ecosystems may involve physiological and genetic mutations in all species and be extended over several generations. Species must undergo evolutionary adaptation due to genetic mutations. With steady warming and changes in air and soil moisture regimes, forest productivity may increase due to a change in the growing season length, increasing photosynthetic activity. On the other hand, productivity is likely to decrease as a result of reduced precipitation and drought. Climatic changes over the vast territory of Russia will occur gradually, and their level will be different in geographically diverse regions. The forest-forming tree species will exhibit various short-term responses associated with the geographical location of the population and the climatic conditions under which the plants evolved during the stable climatic period following their dispersal in the Holocene. At the same time, inherited growth and development parameters will respond to changing climatic conditions, which will be determined by the geographical location of the forest species and their population characteristics. The differential response of tree species needs to be considered when planning forest management measures, adapting them to possible climatic changes.

**For citation:** Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Climate Change and Its Impact on Adaptation and Intraspecific Variability of Conifer Species of the European North of Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25

**Funding:** The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project No. 20-14-50307.

**Keywords:** climate change, conifer species, environmental factors, phenotypic plasticity, intraspecific variability, geographic origins, European North of Russia.

Современные изменения климата поднимают вопрос об их влиянии на леса и разработке стратегии мероприятий по управлению лесным хозяйством, адаптированных под климатические изменения. Важно учесть последствия изменений климата на лесные насаждения, минимизировать эти последствия, разработать новые подходы лесопользования, использовать потенциальные выгоды. Однако для пород, имеющих непрерывный ареал, влияние климатических изменений будет дифференцированным, что связано с географическим положением популяции и климатическими характеристиками, под действием которых она сформировалась.

Цель обзора – анализ влияния наблюдаемого и прогнозируемого изменения климата на адаптационную реакцию древесных пород с учетом их внутривидовой дифференциации для оценки возможности дальнейших исследований в этом направлении и выработки корректив ведения лесного хозяйства на Европейском Севере страны.

*Наблюдаемое и прогнозируемое изменение климата.* Согласно докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), деятельность человека вызвала глобальное потепление примерно на 1 °C по сравнению с показателями доиндустриального времени [43]. По данным Росгидромета [6], средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России в 1976–2020 гг. составила 0,51 °C за 10 лет. По прогнозам МГЭИК, глобальное потепление при сохранении темпов роста с высокой степенью достоверности достигнет 1,5 °C к периоду с 2030 по 2052 г. [43]. Все современные климатические модели прогнозируют в России потепление, заметно превышающее по температурным показателям среднее глобальное потепление. Данные Росгидромета показывают, что на севере страны ожидается увеличение количества осадков, как в зимний период, так и в летний, в южных районах европейской части России оно, наоборот, будет снижаться [6].

На примере Архангельской области также четко прослеживаются глобальные климатические процессы: с 1966 г. наблюдается устойчивое повышение средней годовой температуры воздуха и средней годовой относительной влажности воздуха. Более длительные периоды жаркой и сухой погоды увеличили в регионе количество лесных пожаров и периодов с аномально-холодными погодными условиями [5].

Лесные насаждения выполняют климаторегулирующую функцию как на локальной территории, так и в глобальном масштабе, в том числе обеспечивают регулирование циклов углерода и азота в биосфере, формирование почв, водного и температурного режимов. В то же время они сами являются объектами, подвергающимися воздействию климата. Древесная растительность хорошо адаптирована к существующим климатическим условиям, но потенциально подвержена значительным мутациям при меняющемся климате. Изменение отдельных факторов (температуры, увлажненности, содержания углекислого газа и др.) скажется на росте и метаболической активности древесных растений. Это влияние может быть как прямое, основанное на изменении конкретного фактора,

так и опосредованное, когда изменившиеся факторы будут влиять друг на друга и менять свое действие на природные объекты.

Широко распространенные виды с большими ареалами и высокой плодовитостью, произрастающие на Европейском Севере страны, скорее всего, сохранятся и адаптируются к изменяющемуся климату, но, вероятно, будет наблюдаться задержка ответной реакции у нескольких поколений, что приведет к ослаблению межвидовой конкуренции, способствуя сохранению вида в неоптимальных условиях [17]. При адаптации лесных пород к климатическим изменениям значительную роль сыграет внутри- и межвидовая дифференциация, связанная с фенотипической пластичностью видов и уровнем влияния природных факторов.

*Влияние климатических факторов на древесные виды.* При глобальных климатических изменениях (потеплении) лесные экосистемы прежде всего подвергаются влиянию повышенных температур, что сказывается на метаболизме всех живых организмов. Проблема воздействия повышения температуры на рост и жизненное состояние растений изучается многими исследователями, (см., например, [67, 71]). Высокие температуры, особенно в сочетании с засухой, влияют на все процессы жизнедеятельности растений. В ответ на водный стресс у них активируются многочисленные сигнальные пути и механизмы реагирования, чтобы противодействовать потерям воды и адаптироваться к возникающим угрозам [46].

Изменение метаболизма, связанное с повышением температуры воздуха, прослеживается у различных древесных пород. Например, у ели европейской, произрастающей в Восточной Европе, за последние годы значительно ухудшилось жизненное состояние. Возможной причиной этого в первую очередь признано повышение весенних и летних температур, а также снижение количества осадков [79]. С. Wu с соавторами [81] выделяют среднегодовую температуру, среднюю температуру самых холодных зимних месяцев, среднегодовые осадки и осадки в самый засушливый месяц как основные факторы, влияющие на распространение лиственницы Кемпфера (*Larix kaempferi* Lamb.). Сравнительные данные за 100 лет по сосне обыкновенной, произрастающей в Швеции, показали, что потепление климата за этот период примерно на 1 °С по сравнению с многолетними значениями привело к увеличению длины хвои и снижению ее продолжительности жизни [61].

Разные древесные породы имеют неодинаковую отзывчивость на изменения окружающей среды. Многие авторы приходят к выводу о повышенной чувствительности хвойных пород по сравнению с другими деревьями к климатическим изменениям [31, 79]. Причем ель имеет больший уровень фотосинтетических процессов в весенний период и в большей степени подвержена влиянию возвратных холодов в теплую весну, чем сосна. В мягкие и теплые зимы активность фотосинтеза у ели также повышена, при низком уровне освещенности это может привести к потерям углерода за счет увеличения интенсивности дыхания [52]. Большая уязвимость к наблюдаемому и прогнозируемому изменениям климата наблюдается у ели обыкновенной по сравнению с пихтой [33]. В то же время чувствительность пихты к засушливым условиям очень высока – этот вид не сможет стать альтернативой ели в случае смены пород [79].

В условиях умеренного климата повышение температуры увеличит продолжительность вегетационного периода у растений, что, с одной стороны, благоприятно и приведет к усилению их роста и накоплению биомассы, а с другой, повысит уязвимость к возвратным холодам весной и снизит степень подготовленности к зимнему периоду. Адаптация к тепловому стрессу и засухе зависит, кроме того, от фенологических особенностей древесных пород. Так, по мнению А.В. Nicotra с соавторами [59], фенология семян является ключевым фактором адаптации к экстремальной для растения температуре и засухе у европейского бука. Повышение температуры и уровня  $\text{CO}_2$  может стимулировать фотосинтез у сосны в осенний период и снижать устойчивость дерева к заморозкам [26]. У европейской ели повышение температуры воздуха в осенний период также влияет на морозоустойчивость, задерживая ее развитие [51]. У сосны веймутовой *Pinus strobus* L. проявляются фенотипические варианты: южные происхождения по сравнению с северными чувствительнее к морозу, у северных подготовка к зиме в большей степени регулируется фотопериодом, чем температурой [34]. При потеплении климата сосна обыкновенная может повреждаться весенними заморозками из-за более раннего начала роста [21]. По прогнозным сценариям именно северные европейские виды древесной растительности (ель, сосна, лиственница и береза) окажутся самыми уязвимыми к изменяющемуся климату. Экологические последствия уменьшения ареалов их распространения могут быть серьезными как для лесопользования, так и для природных экосистем [31].

Увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов, в том числе углекислого газа, будет стимулировать рост фотосинтетической активности и фиксации углерода растительностью [42]. Однако в сочетании с другими стрессовыми факторами, такими как повышение температуры и засуха, способность растений получать преимущества от увеличения содержания атмосферного углекислого газа снижается с уменьшением уровня макроэлементов в листьях [63]. Считается, что древесные виды более чувствительны к росту содержания углекислого газа в атмосфере по сравнению с травянистыми видами [16]. Установлено: повышение температуры и уровня  $\text{CO}_2$  может стимулировать фотосинтез у сосны в осенний период, усиливать ее рост, но снижать устойчивость к морозу [26].

Повышение количества осадков в северных широтах и ряде других регионов земного шара приведет к росту содержания атмосферного водяного пара, что найдет выражение в увеличении относительной влажности воздуха и уменьшении дефицита давления водяного пара. Повышение влажности воздуха способствует открытию устьиц и облегчает приток углекислого газа в лист, усиливая фотосинтез вместе с относительно небольшими потерями воды [28]. Снижение скорости транспирации при повышенных атмосферных осадках может улучшить водный баланс растений и защитить их от дефицита воды, но в то же время препятствовать поглощению минеральных питательных веществ из почвы [77]. Высокие температуры, влажность воздуха и конденсированная влага на поверхности листьев повысят риск грибных заболеваний [75], в частности риск поражения сосны обыкновенной грибами рода *Lophodermium* Chevall – шютте обыкновенное [76]. Комбинация факторов окружающей среды

также вызовет увеличение численности насекомых-вредителей [19], из-за чего вырастет риск гибели деревьев. Примером этого может служить усыхание ельников на территории между реками Северная Двина и Пинега в Архангельской области, которое, возможно, связано с уменьшением почвенной влажности, повлекшим вспышки массового размножения стволовых вредителей – причину гибели ослабленных еловых древостоев [13, 15].

Воздействие повышенной влажности сказывается на растениях разного возраста и связано с их видовыми особенностями. Так, результаты полевого эксперимента по увеличению влажности воздуха свидетельствуют о снижении скорости роста при низком дефиците давления водяного пара у березы (*Betula pendula* Roth), моноклональной гибридной осины (*Populus tremula* × *tremuloides* Michx.) в первые годы жизни [78]. Снижение темпов роста и производства биомассы в ответ на увлажнение было более выражено у осины, чем у березы [69], но грибковые поражения в березняках происходили чаще [72]. В то же время длительное повышение относительной влажности воздуха (в течение 5 лет) сказалось на росте осины более заметно, чем на росте березы, которая эффективно акклиматизировалась. Вероятно, береза обладает достаточной фенотипической пластичностью для приспособления к повышенной влажности воздуха, тогда как у осины акклиматизация к увеличению влажности воздуха более сложная [68].

*Фенотипическая реакция лесных сообществ на изменение климата.* Долгоживущие растения не способны к быстрому ответному отклику на изменяющиеся условия среды. Считается, что эффект «адаптивного запаздывания» ответной реакции вида на климатические изменения составляет примерно 100 лет [70] и потребуются несколько поколений [23] для адаптации породы к климатическим изменениям. Это связано с генетическими изменениями и эффектом «эволюционной адаптации» [41].

С точки зрения изучения биоразнообразия северные (бореальные) леса представляют особый интерес, потому что они являются эволюционно самыми молодыми, их приспособительные реакции к суровым условиям произрастания могут быть не завершены в эволюционном плане. В таких популяциях локализуется больше фенотипов по сравнению с центральными [3], а значит, могут присутствовать модификационные фенотипы (приспособительные, адаптационные фенотипы и генотипы).

Популяции древесных видов способны реагировать на изменение климата или адаптироваться к ним разными путями [17]. Во-первых, миграцией в новые места произрастания, соответствующие адаптивным свойствам растений, что вызовет изменение (расширение или сокращение) ареалов видов; во-вторых – через эффект фенотипической пластичности вида, выраженной в меж- и внутривидовой изменчивости; в-третьих – со временем (в долгосрочном аспекте) может произойти естественная генетическая адаптация к новым условиям обитания. Но, скорее всего, эти три варианта будут реализованы одновременно.

Новые климатические условия обуславливают жесткий отбор в естественных популяциях [36]. Если естественные популяции не будут обладать внутривидовой генетической изменчивостью, чтобы адаптироваться к этим новым условиям, и если генный поток окажется недостаточным для введения аллелей, адаптированных к новым климатическим условиям, то популяции будут мигри-

ровать, расширяя условия и территорию произрастания, или сокращать ареал [25]. Однако многие виды не смогут довольно быстро распространиться через сильно фрагментированные антропогенно-преобразованные ландшафты, чтобы успеть за изменением климата [48]. Кроме того, виды, которые окажутся способны успешно расширить свои ареалы в ранее незанятых местообитаниях, испытают адаптивное воздействие среды, к которой они в настоящее время не приспособлены [24].

В настоящее время на территории Российской Федерации сокращается площадь хвойных пород на южной границе ареала с одновременным распространением широколиственных пород [7]. На Полярном Урале в связи с улучшением лесорастительных условий – потеплением и увлажнением климата как в летние, так и в зимние периоды – наблюдается экспансия лиственничных древостоев в горную тундру [73]. Это смещение лесов сопровождается значительным увеличением числа прямоствольных одновершинных деревьев, что приводит к значительному росту фитомассы и накопления углерода [30]. Для Европейского Севера на основании дистанционного зондирования Земли подтверждено связанное с изменением температурного режима почв смещение древесной растительности в северном направлении [1].

При наблюдаемом и прогнозируемом изменении климата фенотипическая пластичность сохраняет первостепенное значение для устойчивости видов древесных растений [55], способствует снижению негативного воздействия меняющегося климата [33]. В основе фенотипической пластичности лежат гомеостатические реакции, что способствует сохранению популяций широко распространенных видов [38]. Генотипы с большей фенотипической пластичностью могут обладать большим акклиматизационным потенциалом, что позволяет им хорошо расти в условиях окружающей среды широкого диапазона [32]. Согласно М.В. Garzón с соавторами [37], у видов и происхождений, отличающихся различной фенотипической пластичностью, следует ожидать и различной реакции на климатические изменения.

Фенотипическая пластичность может быть как адаптивной, так и неадаптивной. Адаптивная фенотипическая пластичность максимально соответствует гетерогенным ландшафтам, когда особи изменяют свои фенотипы в зависимости от окружающей среды в направлении отбора [22]. Адаптивные фенотипические изменения в ответ на меняющийся климат, как правило, обусловлены изменением температурного или водного режимов [35]. Примеры адаптивной фенотипической пластичности разнообразны. Это может быть изменение формы листа, интенсивности фотосинтеза и транспирации и др. Так, у 3 видов дуба – *Quercus alba* L., *Q. palustris* Muench и *Q. velutina* Lam. – в пределах кроны вероятно изменение формы листьев для лучшей адаптации к новому микроклимату: наружные листья значительно меньше, чем те, которые находятся внутри полого кроны [49]. Ель европейская из сухих мест обитания обладает более высокой пластичностью в отношении регулирования потерь воды, в то время как виды с влажных территорий могут иметь большую изменчивость физиологических признаков, связанных с продуктивностью [80].

Усиление проявления климатических изменений, обусловленных глобальными процессами, может благоприятствовать росту фенотипической пластичности [59], а адаптивный вариант пластичности будет способствовать сохранению

популяции на исходном или новом месте произрастания при ее миграции [20]. В краткосрочной перспективе естественные популяции способны справиться с изменяющимися условиями за счет существующей фенотипической пластичности [59]. Однако эта пластичность может оказаться недостаточной, когда особи столкнутся с более значительным изменением климата, выше диапазона текущей изменчивости климатических факторов [45].

Фенотипическая пластичность, наряду с внутривидовой генетической изменчивостью и генным потоком, смягчает негативные последствия долгосрочного изменения климата [59], влияя на силу и направленность отбора, действующего на популяцию, и ускоряя или замедляя адаптивную эволюцию, дивергенцию и видообразование [53]. По прогнозам ученых, долгосрочные изменения в лесных экосистемах будут сопровождаться физиологическими и генетическими перераспределениями у всех видов [65]. При устойчивом потеплении, с одной стороны, за счет изменения продолжительности вегетационного периода и сроков роста, усиления фотосинтетической активности может повышаться продуктивность лесов [23, 66]. Кроме того, изменяются сезонный рост, сроки прохождения фенологических стадий [60, 62], химический состав хвои и перераспределение питательных веществ и др. [39]. С другой стороны, в результате уменьшения количества осадков и возникновения засухи возможно снижение производительности [44].

Различная фенотипическая пластичность породы обуславливает дифференцированный отклик роста на изменения климата [12, 74] и связана с внутривидовой изменчивостью признаков, которая может варьировать у разных региональных популяций видов [47]. Различный отклик географических рас и их территориальная локализация в ареале потребуют дифференциации ответных мер в сфере лесного хозяйства [55]. Без учета внутривидовой реакции на климатические изменения прогностические выводы могут быть недостоверны [29]. Важно учесть все регионы произрастания вида, его внутривидовую изменчивость и фенотипическую пластичность, связанную с исторической миграцией растительности, так как это может дать неожиданные эффекты [56]. Если не принять во внимание генетическую изменчивость и фенотипическую пластичность породы, то прогнозы, скорее всего, окажутся преувеличенными или преуменьшенными [37].

Концентрация отдельных фенотипов в популяциях подвержена клинальной изменчивости в разных направлениях (долготном, широтном, высотном). Для пород с непрерывным ареалом (сосна, ель и др.), расселившихся в Евразии, в том числе на Европейском Севере страны, в голоцене, велико значение географической дифференциации видов, имеющей клинальный ряд и связанной с термическим фактором, который вносит большой вклад в рост деревьев, на 62 % обеспечивая формирование ширины годичного кольца [40]. Для Европейского Севера страны клинальность изменения роста и продуктивности лесных насаждений в широтном направлении была обоснована И.В. Волосевичем [2], который показал, что на каждый градус широты характеристики роста изменяются на одинаковую величину в процентном выражении и создают единство широтной изменчивости.

В настоящее время общепризнан для оценки реакции древесных пород на климатические изменения опыт географических культур [18], в которых выращивают климатипы древесных пород, перенесенные с севера в более южные условия и, наоборот – с юга в более северные. Опыты с происходившими

стали полигоном для моделирования эффектов влияния климатических изменений на рост основных лесобразующих пород. С помощью таких экспериментальных площадок можно наблюдать дифференцированную специфическую адаптацию [27], «термическую память» и фенотипическую пластичность породы [46]. Географические расы древесных пород отличаются адаптационными признаками, генетическими комплексами [12], а следовательно, могут иметь различную отзывчивость на климатические изменения [10]. При этом вероятно проявление широкого спектра генетического разнообразия вида, отражающего его дифференциацию и экологическую устойчивость.

Исследованиями в опытах с происхождениями сосны обыкновенной и других видов в России и зарубежных странах показано, в том числе по итогам изучения потомств сосны и ели в 4 пунктах испытания на Европейском Севере [12], что климатипы более северных местообитаний (по отношению к пункту испытания) демонстрируют более высокий ростовой отклик на потепление, чем произрастающие южнее [54, 65], хотя по параметрам они не достигают размеров более южных [12]. Причины таких откликов могут быть связаны с генетическим контролем, специфической адаптацией к климатическим условиям произрастания географической расы, сформировавшейся при расселении сосны в голоцене (также и на север Русской равнины). Для северных рас хвойных пород характерна наследственно закрепленная меньшая потребность в сумме эффективных температур, необходимых для реализации потенциала роста [12, 50, 60].

Выращивание потомства разного географического происхождения при разной дальности переброски семян в пункты испытания позволяет оценить реакцию потомства на изменения термического фактора различного уровня [11] и подойти к выявлению нормы реакции вида [8], т. е. величины изменения показателя на определенный диапазон климатических изменений, которая проявляется на уровне фенотипа в соответствии с приспособляемостью вида (его расы) к условиям среды.

Считается, что увеличение высоты деревьев за счет климатических изменений к 2080 г. может составить до 45 % [44]. Однако «норма реакции» проявляется на уровне фенотипа в соответствии с приспособляемостью вида (его расы) к условиям среды, и насаждения лесных пород, произрастающие в различных географических местоположениях в пределах непрерывного ареала, будут демонстрировать разный уровень реакции на климатические изменения, что связано с дифференцированной специфической адаптацией и «термической памятью» [27, 46].

Ель обыкновенная, распространенная на Русской равнине, в лесоводственных целях рассматривается [14] с точки зрения изменчивости одного вида – *Picea abies* (L.) Karst. x *P. obovata* (Ledeb.) – хотя представлена двумя видами – *P. abies* (L.) Karst. и *P. obovata* (Ledeb.), – образующими естественные (интрогрессивные) гибриды, близкие *P. abies* и близкие *P. obovata*. На стыке эволюционных путей миграции ели в послеледниковый период могли проявиться модификационные (приспособительные, адаптационные) фенотипы и генотипы. Их реакция на климатические изменения представляет интерес с точки зрения изучения возможностей адаптации этих фенотипов и генотипов к климатическим изменениям и прогноза вероятных направлений миграции в долгосрочной перспективе.

Наши исследования [56–58], объектом которых стали коллекции климатипов 3 пунктов испытания географических культур Европейского Севера России (Архангельская, Вологодская области и Республика Коми), позволили с применением различных подходов, в том числе метода Эберхарта и Рассела, широко используемого в подобных исследованиях за рубежом [74], провести экологическую (фенотипическую) оценку потомств ели европейской, сибирской и их гибридных форм. Установлено, что *P. abies* в силу большей пластичности более отзывчива к климатическим изменениям. *P. obovata* – вид более консервативный – реагирует на климатические изменения слабее. Это согласуется с общими выводами S. Kareller с соавторами [44] для *P. abies* о том, что южная ель из зон с большей температурой и меньшим количеством осадков будет наиболее подходящей для использования в новых климатических условиях. Однако в этом случае при будущем потеплении климата на северных территориях можно ожидать прогресса в расселении *P. abies* по Русской равнине, наступления данного вида на *P. obovata* и, возможно, смещения зоны интрогрессивной гибридизации в сторону севера.

При моделировании реакции сосны обыкновенной на определенные уровни климатических изменений на примере потомства 3 географических рас, произрастающих в географических культурах Архангельской области [11], установлено, что с ростом суммы температур выше +10 °C на 280 °C в культурах 2-го класса возраста произойдет увеличение средних высоты, диаметра, объема ствола не более чем на 10–20 %. То есть при потеплении климата на Европейском Севере увеличение роста сосны может составить порядка 3–6 % на каждые 100 °C суммы температур выше +10 °C. При похолодании климата на примерно такую же величину (250° суммы эффективных температур выше +10 °C) диаметр, высота и объем ствола снижаются на 4–15 %. В среднем при похолодании климата уменьшение продуктивности при понижении суммы эффективных температур на каждые 100 °C снизится на 2–5 %.

С использованием подобных подходов и объектов географических культур в южной и центральной Швеции установлены [64] показатели адаптивной нормы реакции на перемещение потомства сосны обыкновенной к югу на 2 ° с. ш., что давало эффект прироста в 30-летних посадках на 1,25–2,0 м. При этом качество стволов было выше.

Фенотипическая реакция древесных пород на увеличение температуры проявляется не только в росте, но и в репродуктивной активности, что особенно характерно для основной лесообразующей породы – сосны обыкновенной [9, 11]. При этом северная сосна при потеплении (переносе потомства в более благоприятные с точки зрения температурного фактора условия) раньше вступает в репродукцию, увеличивает число репродуцирующих деревьев, количество макро- и микростробиллов. И у сосны, и у ели в 1,5–2 раза повышаются масса и всхожесть семян. Репродуктивная реакция сосны клинально связана с уровнем потепления и переходит в отрицательный эффект при снижении температуры.

Отклик в репродуктивной сфере, так же как и ростовые реакции лесообразующих пород, нужно учитывать при планировании лесохозяйственных мероприятий, рассматривая возможность адаптации деревьев к возможным климатическим изменениям.

*Ведение лесного хозяйства в новых климатических условиях.* С точки зрения лесного хозяйства важно учесть и минимизировать последствия, разработать

новые подходы лесопользования, извлекать потенциальные выгоды [46], рассматривая как краткосрочные, так и долгосрочные эффекты от будущего потепления климата [65]. Например, в регионах России, где повышение температуры сопровождается возрастанием количества осадков, могут преобладать позитивные эффекты климатических изменений при условии эффективной охраны леса от пожаров [7]. При разработке мер ведения лесного хозяйства в условиях меняющегося климата необходимо принимать во внимание важность экосистемных функций лесов [4]. Это предопределяет учет меж- и внутривидовой реакции на климатические изменения, без которого существует риск недостоверных выводов по прогнозам [29], поскольку разный отклик популяций одного и того же вида и их территориальная локализация в ареале вызовут дифференциацию ответных мер в сфере лесного хозяйства [55]. В случае увеличения масштабов изменения климата, когда генетически обусловленная способность к адаптации снижена и недостаточна для предотвращения последствий влияния этих изменений, следует проводить мероприятия, повышающие экологическую устойчивость леса. При более сильном воздействии климатических изменений, если адаптационных возможностей лесных экосистем уже недостаточно и происходит смена этих экосистем на нелесные, оптимальным вариантом действий является лесохозяйственное управление, содействующее изменениям.

#### Заключение

Климатические изменения на обширной территории России будут происходить постепенно, и в разных географических регионах уровень их будет различным. Лесобразующие древесные породы проявят краткосрочный отклик, связанный с географическим положением популяций и сформировавшимися их за время относительно стабильного климатического периода после расселения в голоцене климатическими условиями. В то же время наследственно закрепленные показатели роста и развития откликнутся на сдвиг климатических параметров, который будет определяться географическим положением лесобразующих пород и их популяционными особенностями, закрепленными в генотипе и проявляющимися в фенотипе. Дифференцированный отклик древесных пород необходимо учитывать при планировании лесохозяйственных мероприятий, адаптируя их к возможным климатическим изменениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белоновская Е.А., Тишков А.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке-мл. А.Н., Морозова О.В., Покровская И.В., Царевская Н.Г., Тertiцкий Г.М. «Позеленение» Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Изв. Рос. акад. наук. Сер.: Географическая. 2016. № 3. С. 28–39. Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Vaisfeld M.A., Glazov P.M., Krenke Jr. A.N., Morozova O.V., Pokrovskaya I.V., Tsarevskaya N.G., Tertitskii G.M. “Greening” of the Russian Arctic and the Modern Trends of Transformation of Its Biota. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 3, pp. 28–39. DOI: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-28-39>

2. Волосевич И.В. Закономерности широтной изменчивости роста древесной растительности в лесах Европейского Севера и их практическое использование // Лесохозяйственные исследования на зонально-типологической основе. Архангельск: Арханг. ин-т леса и лесохимии, 1984. С. 27–38. Volosevich I.V. Patterns of Latitudinal Variability of

Woody Vegetation Growth in the Forests of the European North and Their Practical Use. *Forestry Research on a Zonal-Typological Basis*. Arkhangelsk, AFFCI Publ., 1984, pp. 27–38.

3. Гончаренко Г.Г., Дробышевская В.В., Силин А.Е., Падутов В.Е. Генетические ресурсы сосен России и сопредельных государств // Докл. АН. 1996. Т. 346, № 3. С. 419–423. Goncharenko G.G., Drobyshevskaya V.V., Silin A.E., Padutov V.E. Genetic Resources of Pine Trees of Russia and Neighboring Countries. *Doklady Akademii nauk*, 1996, vol. 346, no. 3, pp. 419–423.

4. Григорьев А., Щеголев А., Луговая Д. Глобальное изменение климата и адаптация к нему лесного комплекса Северо-Западного федерального округа России: использование опыта Швеции и Финляндии // Устойчивое лесопользование. 2019. № 2(58). С. 28–33. Grigor'yev A., Shchegolev A., Lugovaya D. Global Climate Change and Adaptation to It of the Forestry Complex of the North-West Federal District of Russia: Using the Experience of Sweden and Finland. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2019, no. 2(58), pp. 28–33.

5. Грищенко И.В. Климат Архангельской области. Архангельск, 2017. 203 с. Grishchenko I.V. *Climate of the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, 2017. 203 p.

6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с. *Report on Climate Patterns on the Territory of the Russian Federation in 2020*. Moscow, 2021. 104 p.

7. Замолодчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4(48). С. 23–31. Zamolodchikov D., Krayev G. Climate Change Influence on the Forests of Russia: Recorded Impacts and Forecast Estimates. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2016, no. 4(48), pp. 23–31.

8. Матъяхи Ч. Генетические и экологические ограничения адаптации // Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений. М., 1989. С. 60–67. Mat'yash Ch. Genetic and Ecological Restrictions of Adaptation. *Forest Genetics, Selection and Physiology of Woody Plants: Proceedings of the International Symposium*. Moscow, 1989, pp. 60–67.

9. Наквасина Е.Н. Изменения в генеративной сфере сосны обыкновенной при имитации потепления климата // Изв. СПбЛТА. 2014. Вып. 209. С. 114–125. Nakvasina E.N. Changes in the Generative Sphere of Scots Pine under Imitation Warming. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2014, iss. 209, pp. 114–125.

10. Наквасина Е.Н., Юдина О.А., Покатило А.В. Ростовая и репродуктивная реакции *Picea abies* (L.) Karst. x *P. obovata* (Ledeb.) при имитации потепления климата // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2016. № 1. С. 89–96. Nakvasina E.N., Yudina O.A., Pokatilo A.V. Growth and Reproductive Response of *Picea abies* (L.) Karst. x *P. obovata* Ledeb. in Climate Change Simulation. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"], 2016, no. 1, pp. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.1.89>

11. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Чупров А.В., Беляев В.В. Реакция роста сосны обыкновенной на климатические изменения в широтном градиенте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 82–93. Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Chuprov A.V., Belyaev V.V. Growth Response of Scots Pine to Climate Change in the Latitudinal Gradient. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 82–93. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.82>

12. Наквасина Е.Н., Юдина О.А., Прожерина Н.А., Камалова И.И., Минин Н.С. Географические культуры в ген-экологических исследованиях на Европейском Севере. Архангельск: АГТУ, 2008. 308 с. Nakvasina E.N., Yudina O.A., Prozherina N.A., Kamalova I.I., Minin N.S. *Provenance Trials in Gene-Ecological Researches in the European North*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 308 p.

13. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов России за 2006 год. Пушкино: Рос. центр защиты леса, 2007. 160 с. *Review of Sanitary and Forest Pathology State of Russian Forests in 2006*. Pushkino, Russian Centre of Forest Health Publ., 2007. 160 p.
14. Понов П.П. Ель европейская и сибирская: структура, интеграция и дифференциация популяционных систем. Новосибирск: Наука, 2005. 231 с. Popov P.P. *European Spruce and Siberian Spruce: The Structure, Integration and Differentiation of the Population Systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 231 p.
15. Aakala T., Kuuluvainen T. Summer Droughts Depress Radial Growth of *Picea abies* in Pristine Taiga of the Arkhangelsk Province, Northwestern Russia *Dendrochronologia*, 2011, vol. 29, iss. 2, pp. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.07.001>
16. Ainsworth E.A., Long S.P. What Have We Learned from 15 Years of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE)? A Meta-Analytic Review of the Responses of Photosynthesis, Canopy Properties and Plant Production to Rising CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 2005, vol. 165, iss. 2, pp. 351–372. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x>
17. Aitken S.N., Yeaman S., Holliday J.A., Wang T., Curtis-McLane S. Adaptation, Migration or Extirpation: Climate Change Outcomes for Tree Populations. *Evolutionary Applications*, 2008, vol. 1, iss. 1, pp. 95–111. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
18. Alberto F., Aitken S.N., Alía R., González-Martínez S.C., Hänninen H., Kremer A., Lefèvre F., Lenormand T., Yeaman S., Whetten R., Savolainen O. Potential for Evolutionary Responses to Climate Change – Evidence from Tree Populations. *Global Change Biology*, 2013, vol. 19, pp. 1645–1661. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12181>
19. Anderegg W.R.L., Hicke J.A., Fisher R.A., Allen C.D., Aukema J., Bentz B., et al. Tree Mortality from Drought, Insects, and Their Interactions in a Changing Climate. *New Phytologist*, 2015, vol. 208, iss. 3, pp. 674–683. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13477>
20. Anderson J.T., Gezon Z.J. Plasticity in Functional Traits in the Context of Climate Change: A Case Study of the Subalpine Forb *Boechera stricta* (Brassicaceae). *Global Change Biology*, 2015, vol. 21, iss. 4, pp. 1689–1703. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12770>
21. Andersson G.B., Persson T., Fedorkov A., Mullin T.J. Longitudinal Differences in Scots Pine Shoot Elongation. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 5, art. 10040. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10040>
22. Baythavong B.S., Stanton M.L. Characterizing Selection on Phenotypic Plasticity in Response to Natural Environmental Heterogeneity. *Evolution*, 2010, vol. 64, iss. 10, pp. 2904–2920. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2010.01057.x>
23. Beaulieu J., Rainville A. Adaptation to Climate Change: Genetic Variation Is Both a Short- and a Long-Term Solution. *The Forestry Chronicle*, 2005, vol. 81, no. 5, pp. 704–709. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc81704-5>
24. Brown C.D., Vellend M. Non-Climatic Constraints on Upper Elevational Plant Range Expansion under Climate Change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, vol. 281, iss. 1794, art. 20141779. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1779>
25. Carja O., Plotkin J.B. Evolutionary Rescue through Partly Heritable Phenotypic Variability. *Genetics*, 2019, vol. 211, iss. 3, pp. 977–988. DOI: <https://doi.org/10.1534/genetics.118.301758>
26. Chang C.Y., Fréchette E., Unda F., Mansfield S.D., Ensminger I. Elevated Temperature and CO<sub>2</sub> Stimulate Late-Season Photosynthesis But Impair Cold Hardening in Pine. *Plant Physiology*, 2016, vol. 172, iss. 2, pp. 802–818. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.16.00753>
27. Correia I., Alía R., Yan W., David T., Aguiar A., Almeida M.H. Genotype × Environment Interactions in *Pinus pinaster* at Age 10 in a Multienvironment Trial in Portugal: A Maximum Likelihood Approach. *Annals of Forest Science*, 2010, vol. 67, art. 612. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest/2010025>
28. Dai Z., Edwards G.E., Ku M.S. Control of Photosynthesis and Stomatal Conductance in *Ricinus communis* L. (Castor Bean) by Leaf to Air Vapour Pressure Deficit. *Plant Physiology*, 1992, vol. 99, iss. 4, pp. 1426–1434. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.99.4.1426>

29. De Luis M., Čufar K., Di Filippo A., Novak K., Papadopoulos A., Piovesan G., Rathgeber C.B.K., Raventós J., Saz M.A., Smith K.T. Plasticity in Dendroclimatic Response across the Distribution Range of Aleppo Pine (*Pinus halepensis*). *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, iss. 12, art. e83550. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083550>
30. Devi N., Hagedorn F., Moiseev P., Bugmann H., Shiyatov S., Mazepa V., Rigling A. Expanding Forests and Changing Growth Forms of Siberian Larch at the Polar Urals Treeline during the 20th Century. *Global Change Biology*, 2008, vol. 14, iss. 7, pp. 1581–1591. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01583.x>
31. Dyderski M.K., Paž S., Frelich L.E., Jagodziński A.M. How Much Does Climate Change Threaten European Forest Tree Species Distributions? *Global Change Biology*, 2018, vol. 24, iss. 3, pp. 1150–1163. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13925>
32. Enoki T., Takagi M., Ugawa S., Nabeshima E., Ishii H. Regional and Topographic Growth Variation among 45-Year-Old Clonal Plantations of *Cryptomeria japonica*: Effects of Genotype and Phenotypic Plasticity. *Journal of Forest Research*, 2020, vol. 25, iss. 5, pp. 329–338. DOI: <https://doi.org/10.1080/13416979.2020.1767267>
33. Frank A., Pluess A.R., Howe G.T., Sperisen C., Heiri C. Quantitative Genetic Differentiation and Phenotypic Plasticity of European Beech in a Heterogeneous Landscape: Indications for Past Climate Adaptation. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2017, vol. 26, pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.02.001>
34. Fréchette E., Chang C.Y.-Y., Ensminger I. Variation in the Phenology of Photosynthesis among Eastern White Pine Provenances in Response to Warming. *Global Change Biology*, 2020, vol. 26, iss. 9, pp. 5217–5234. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15150>
35. Fréjaville T., Vizcaíno-Palomar N., Fady B., Kremer A., Garzón M.B. Range Margin Populations Show High Climate Adaptation Lags in European Trees. *Global Change Biology*, 2020, vol. 26, iss. 2, pp. 484–495. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14881>
36. Fu Y.-Bi., Peterson G.W., Horbach C., Konkin D.J., Beiles A., Nevo E. Elevated Mutation and Selection in Wild Emmer Wheat in Response to 28 Years of Global Warming. *PNAS*, 2019, vol. 116(40), pp. 20002–20008. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1909564116>
37. Garzón M.B., Alía R., Robson T.M., Zavala M.A. Intra-Specific Variability and Plasticity Influence Potential Tree Species Distributions under Climate Change. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, vol. 20, iss. 5, pp. 766–778. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00646.x>
38. Gomez-Mestre I., Jovani R. A Heuristic Model on the Role of Plasticity in Adaptive Evolution: Plasticity Increases Adaptation, Population Viability and Genetic Variation. *Proceedings of the Royal Society B*, 2013, vol. 280, iss. 1771, art. 20131869. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.1869>
39. Gray C.A., Runyon J.B., Jenkins M.J. Great Basin Bristlecone Pine Volatiles as a Climate Change Signal across Environmental Gradients. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2019, vol. 2, 10 p. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00010>
40. Hart J.L., van de Gevel S.L., Sakulich J., Grissino-Maye H.D. Influence of Climate and Disturbance on the Growth of *Tsuga canadensis* at Its Southern Limit in Eastern North America. *Trees*, 2010, vol. 24, pp. 621–633. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0432-y>
41. Huang J-G., Bergeron Y., Berninger F., Zhai L., Tardif J.C., Denneler B. Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, iss. 2, art. e56758. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056758>
42. Hyvönen R., Ågren G.I., Linder S., Persson T., Cotrufo F., Ekblad A., et al. The Likely Impact of Elevated [CO<sub>2</sub>], Nitrogen Deposition, Increased Temperature and Management on Carbon Sequestration in Temperate and Boreal Forest Ecosystems: A Literature Review. *New Phytologist*, 2007, vol. 173, iss. 3, pp. 463–480. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01967.x>

43. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. by the Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland, IPCC, 2015. 151 p.

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

45. Kelly M. Adaptation to Climate Change through Genetic Accommodation and Assimilation of Plastic Phenotypes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019, vol. 374, iss. 1768, art. 20180176. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0176>

46. Kijowska-Oberc J., Staszak A.M., Kamiński J., Ratajczak E. Adaptation of Forest Trees to Rapidly Changing Climate. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 2, art. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11020123>

47. Kramer R.D., Ishii H.R., Carter K.R., Miyazaki Y., Cavaleri M.A., Araki M.G., Azuma W.A., Inoue Y., Hara C. Predicting Effects of Climate Change on Productivity and Persistence of Forest Trees. *Ecological Research*, 2020, vol. 35, iss. 4, pp. 562–574. DOI: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12127>

48. Kremer A., Ronce O., Robledo-Arnuncio J.J., Guillaume F., Bohrer G., Nathan R., et al. Long-Distance Gene Flow and Adaptation of Forest Trees to Rapid Climate Change. *Ecology Letters*, 2012, vol. 15, iss. 4, pp. 378–392. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01746.x>

49. Kusi J., Karsai I. Plastic Leaf Morphology in Three Species of *Quercus*: The More Exposed Leaves Are Smaller, More Lobated and Denser. *Plant Species Biology*, 2020, vol. 35, iss. 1, pp. 24–37. DOI: <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12253>

50. Leites L.P., Robinson A.P., Rehfeldt G.E., Marshall J.D., Crookston N.L. Height-Growth Response to Climatic Changes Differs among Populations of Douglas-Fir: A Novel Analysis of Historic Data. *Ecological Applications*, 2012, vol. 22, iss. 1, pp. 154–165. DOI: <https://doi.org/10.1890/11-0150.1>

51. Levkoev E., Mehtätalo L., Luostarinen K., Pulkkinen P., Zhigunov A., Peltola H. Development of Height Growth and Frost Hardiness for One-Year-Old Norway Spruce Seedlings in Greenhouse Conditions in Response to Elevated Temperature and Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 3, art. 9980. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.9980>

52. Linkosalo T., Heikkinen J., Pulkkinen P., Mäkipää R. Fluorescence Measurements Show Stronger Cold Inhibition of Photosynthetic Light Reactions in Scots Pine Compared to Norway Spruce as Well as during Spring Compared to Autumn. *Frontiers in Plant Science*, 2014, vol. 5, art. 264. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00264>

53. Markov A.V., Ivnitky S.B. Evolutionary Role of Phenotypic Plasticity. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 2016, vol. 71, iss. 4, pp. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0096392516040076>

54. Matías L., Jump A.S. Impacts of Predicted Climate Change on Recruitment at the Geographical Limits of Scots Pine. *Journal of Experimental Botany*, 2014, vol. 65, iss. 1, pp. 299–310. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ert376>

55. Mátyás Cs. Migratory, Genetic and Phenetic Response Potential of Forest Tree Populations Facing Climate Change. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2006, vol. 2, pp. 33–46.

56. Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of Phenotypic Plasticity of Spruce Species *Picea abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on Provenances Tests in European North of Russia. *Central European Forestry Journal*, 2019, vol. 65, pp. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0012>

57. Nakvasina E.N., Demina N.A., Prozherina N.A. Evaluation of Survival and Growth of *Picea abies* (L.) H. Karst. and *Picea obovata* Ledeb. Provenances in the North of Russia. *Journal of Forest Science*, 2017, vol. 63, iss. 9, pp. 401–407. DOI: <https://doi.org/10.17221/74/2017-JFS>

58. Nakvasina E.N., Volkov A.G., Prozherina N.A. Provenance Experiment with Spruce (*Picea abies* (L.) Karst. and *Picea obovata* (Ledeb.)) in the North of Russia (Arkhangelsk Region). *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2017, vol. 59, iss. 3, pp. 219–230. DOI: <https://doi.org/10.1515/ffp-2017-0023>
59. Nicotra A.B., Atkin O.K., Bonser S.P., Davidson A.M., Finnegan E.J., Mathesius U., Poot P., Purugganan M.D., Richards C.L., Valladares F., van Kleunen M. Plant Phenotypic Plasticity in a Changing Climate. *Trends in Plant Science*, 2010, vol. 15, iss. 12, pp. 684–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>
60. Oleksyn J., Tjoelker M.G., Reich P.B. Adaptation to Changing Environment in Scots Pine Populations across a Latitudinal Gradient. *Silva Fennica*, 1998, vol. 32, no. 2, pp. 129–140. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.691>
61. Oleksyn J., Wyka T.P., Żytkowiak R., Zadworny M., Mucha J., Dering M., Ufnalski K., Nihlgård B., Reich P.B. A Fingerprint of Climate Change across Pine Forests of Sweden. *Ecology Letters*, 2020, vol. 23, iss. 12, pp. 1739–1746. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.13587>
62. Pakharkova N.V., Kuzmina N.A., Kuzmin S.R., Efremov A.A. Morphophysiological Traits of Needles in Different Climatypes of Scots Pine in Provenance Trial. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, iss. 1, pp. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425514010107>
63. Penuelas J., Fernández-Martínez M., Vallicrosa H., Maspons J., Zuccarini P., Carnicer J., Sanders T.G.M., Krüger I., Obersteiner M., Janssens I.A., Ciais P., Sardans J. Increasing Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations Correlate with Declining Nutritional Status of European Forests. *Communications Biology*, 2020, vol. 3, iss. 1, art. 125. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0839-y>
64. Prescher F., Ståhl E.G. The Effect of Provenance and Spacing on Stem Straightness and Number of Spike Knots of Scots Pine in South and Central Sweden. *Studia Forestalia Suecica*, 1986, no. 172. 12 p.
65. Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Milyutin L.I., Parfenova E.I., Wykoff W.R., Kouzmina N.A. Assessing Population Responses to Climate in *Pinus sylvestris* and *Larix* spp. of Eurasia with Climate-Transfer Models. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 6, iss. 2, pp. 83–98.
66. Rehfeldt G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Ye.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I. Intraspecific Responses to Climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 2002, vol. 8, iss. 9, pp. 912–929. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x>
67. Rennenberg H., Loreto F., Polle A., Brillì F., Fares S., Beniwal R.S., Gessler A. Physiological Responses of Forest Trees to Heat and Drought. *Plant Biology*, 2006, vol. 8, iss. 5, pp. 556–571. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2006-924084>
68. Rosenvald K., Löhmus K., Rohula-Okunev G., Lutter R., Kupper P., Tullus A. Elevated Atmospheric Humidity Prolongs Active Growth Period and Increases Leaf Nitrogen Resorption Efficiency of Silver Birch. *Oecologia*, 2020, vol. 193, pp. 449–460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04688-8>
69. Rosenvald K., Tullus A., Ostonen I., Uri V., Kupper P., Aosaar J., Varik M., Söber J., Niglas A., Hansen R., Rohula G., Kukk M., Söber A., Löhmus K. The Effect of Elevated Air Humidity on Young Silver Birch and Hybrid Aspen Biomass Allocation and Accumulation – Acclimation Mechanisms and Capacity. *Forest Ecology and Management*, 2014, vol. 330, pp. 252–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.016>
70. Savolainen O., Bokma F., García-Gil R., Komulainen P., Repob T. Genetic Variation in Cessation of Growth and Frost Hardiness and Consequences for Adaptation of *Pinus sylvestris* to Climatic Changes. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 197, iss. 1-3, pp. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.006>

71. Saxe H., Cannell M.G.R., Johnsen Ø., Ryan M.G., Vourlitis G. Tree and Forest Functioning in Response to Global Warming. *New Phytologist*, 2001, vol. 149, iss. 3, pp. 369–399. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x>

72. Sellin A., Alber M., Keinänen M., Kupper P., Lihavainen J., Löhmus K., Oksanen E., Söber A., Söber J., Tullus A. Growth of Northern Deciduous Trees under Increasing Atmospheric Humidity: Possible Mechanisms behind the Growth Retardation. *Regional Environmental Change*, 2017, vol. 17, pp. 2135–2148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1042-z>

73. Shiyatov S.G., Mazepa V.S. Contemporary Expansion of Siberian Larch into the Mountain Tundra of the Polar Urals. *Russian Journal of Ecology*, 2015, vol. 46, iss. 6, pp. 495–502. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1067413615060168>

74. Shutyaev A.M., Giertych M.J. Height Growth Variation in a Comprehensive Eurasian Provenance Experiment of (*Pinus sylvestris* L.). *Silvae Genetica*, 1998, vol. 46, iss. 6, pp. 332–349.

75. Sturrock R.N., Frankel S.J., Brown A.V., Hennon P.E., Kliejunas J.T., Lewis K.J., Worrall J.J., Woods A.J. Climate Change and Forest Diseases. *Plant Pathology*, 2011, vol. 60, iss. 1, pp. 133–149. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>

76. Tchebakova N.M., Kuzmina N.A., Parfenova E.I., Senashova V.A., Kuzmin S.R. Assessment of Climatic Limits of Needle Cast-Affected Area under Climate Change in Central Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, vol. 9, iss. 6, pp. 721–729. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425516060135>

77. Tinker B.P., Nye P. *Solute Movement in the Rhizosphere*. Oxford, Oxford University Press, 2001. 444 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195124927.001.0001>

78. Tullus A., Kupper P., Kaasik A., Tullus H., Löhmus K., Söber A., Sellin A. The Competitive Status of Trees Determines Their Responsiveness to Increasing Atmospheric Humidity – a Climate Trend Predicted for Northern Latitudes. *Global Change Biology*, 2017, vol. 23, iss. 5, pp. 1961–1974. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13540>

79. Vejputsková M., Cihák T. Climate Response of Douglas Fir Reveals Recently Increased Sensitivity to Drought Stress in Central Europe. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 2, art. 97. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10020097>

80. Wang M.H., Wang J.R., Zhang X.W., Zhang A.P., Sun S., Zhao C.M. Phenotypic Plasticity of Stomatal and Photosynthetic Features of Four *Picea* Species in Two Contrasting Common Gardens. *AoB PLANTS*, 2019, vol. 11, iss. 4, art. plz034. DOI: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plz034>

81. Wu C., Shen J., Chen D., Du C., Sun X., Zhang S. Estimating the Distribution Characters of *Larix kaempferi* in Response to Climate Change. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2020, vol. 13, iss. 6, pp. 499–506. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3570-013>

УДК 630\*165.51

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-26-38

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И ПОСЕВНЫХ КАЧЕСТВ СЕМЯН ВИДОВ РОДА *Larix* Mill. В УСЛОВИЯХ ИНТРОДУКЦИИ

**В.А. Брынцев**<sup>1,2</sup>, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: O-4591-2019*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>*

**М.А. Лавренов**<sup>1</sup>, *канд. с.-х. наук, ст. преподаватель*; *ResearcherID: E-2995-2018*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>*

**А.А. Коженкова**<sup>2</sup>, *канд. с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: AAN-2228-2021*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>*

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; e-mail: bryntsev@mail.ru, lavrenov@mgul.ac.ru

<sup>2</sup>Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, Москва, Россия, 127276; e-mail: kozhenkova\_anna@mail.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 04.04.20 / Принята к печати 03.08.20

---

**Аннотация.** Представлены результаты исследования морфологических признаков и посевных качеств семян видов лиственниц, интродуцированных в центр европейской части России (*Larix sibirica* Ledeb., *L. sukaczewii* Dyl., *L. decidua* Mill., *L. marschlinii* Coaz, *L. olgensis* A. Henry, *L. principis-rupprechtii* Mayr, *L. kaempferi* (Lamb.) Carriere, *L. laricina* (Du Roi) K. Koch). Исследования проводили в Москве (Главный ботанический сад РАН) и Подмоскowie (Ивантеевский дендросад, Егорьевское месторождение фосфоритов). Данная тема актуальна, т. к. определение всхожести и жизнеспособности семян имеет существенное значение для интродукционных работ, при этом в ГОСТах об определении посевных качеств и класса качества семян нет рекомендаций для лиственниц американской и принца Рупрехта. Представленные в работе данные об изменчивости морфологических признаков семян различных видов лиственниц позволяют раскрыть их биологические особенности в условиях интродукции, что может стать основой для расширения использования изученных растений в центре европейской части России. Учитывали индивидуальную изменчивость длины и ширины семян, связь этих признаков, а также энергию прорастания, всхожесть, жизнеспособность и класс качества семян. Определено, что у лиственницы ольгинской семена некондиционные. Семена остальных видов лиственниц (сибирской, Сукачева, европейской, Маргилинда, принца Рупрехта, японской, американской) относятся ко 2-му и 3-му классам качества, это позволяет рекомендовать данные виды для посева. У лиственницы сибирской, произрастающей на Егорьевском месторождении фосфоритов, выявлено снижение посевных качеств семян (по сравнению с данным видом из Главного ботанического сада РАН) и отсутствие связи длины и ширины семян (в сопоставлении с другими объектами исследования). Корреляционный анализ показал отличия прямолинейной и криволинейной связей длины и ширины семян у лиственниц сибирской и Сукачева, а также у лиственниц Маргилинда и ее родительских видов (лиственниц европейской и японской).

**Для цитирования:** Брынцев В.А., Лавренов М.А., Коженкова А.А. Исследование морфологических признаков и посевных качеств семян видов рода *Larix* Mill. в условиях интродукции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 26–38. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-26-38

*Ключевые слова:* лиственница, посевные качества семян, всхожесть, энергия прорастания, интродукция.

## STUDYING MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND SOWING QUALITIES OF SEEDS OF SPECIES OF THE GENUS *Larix* Mill. IN THE CONDITIONS OF INTRODUCTION

*Vladimir A. Bryntsev*<sup>1,2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [O-4591-2019](https://orcid.org/0000-0002-6271-1444), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6271-1444>

*Maxim A. Lavrenov*<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Senior Lecturer; ResearcherID: [E-2995-2018](https://orcid.org/0000-0001-9708-9037), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9708-9037>

*Anna A. Kozhenkova*<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAN-2228-2021](https://orcid.org/0000-0003-1518-7165), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-7165>

<sup>1</sup>Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institut'skaya, 1, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: [bryntsev@mail.ru](mailto:bryntsev@mail.ru), [lavrenov@mgu.ac.ru](mailto:lavrenov@mgu.ac.ru)

<sup>2</sup>Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, ul. Botanicheskaya, 4, Moscow, 127276, Russian Federation; e-mail: [kozhenkova\\_anna@mail.ru](mailto:kozhenkova_anna@mail.ru)

---

Original article / Received on April 4, 2020 / Accepted on August 3, 2020

---

**Abstract.** The paper presents the results of studying morphological characteristics and sowing qualities of seeds of larch species introduced to the center of European Russia (*Larix sibirica* Ledeb., *L. sukaczewii* Dyl., *L. decidua* Mill., *L. marschlinsii* Coaz, *L. olgensis* A. Henry, *L. principis-rupprechtii* Mayr, *L. kaempferi* (Lamb.) Carriere, *L. laricina* (Du Roi) K. Koch). The research was carried out in Moscow (Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences) and the Moscow region (Ivanteevsky Dendrological Garden, Yegoryevsky phosphorite deposit). This topic is urgent since determination of seed germination and viability is essential for introduction, whereas there are no recommendations for American larch and Prince Rupprecht's larch in the State Standards (GOST) for determination of sowing qualities and quality class of seeds. The data on the variability of morphological characteristics of seeds of different larch species presented in the paper allow revealing their biological features under introduction conditions, which can be the basis for expanding the use of the studied plants in the center of European Russia. The individual variability of seed length and width, the relationship of these characteristics, as well as germination energy, germination, viability, and seed quality class were considered. Olga Bay larch has substandard seeds. Seeds of other larch species (Siberian, Sukachev's, European, Margilind, Prince Rupprecht's, Japanese and American larches) belong to the 2nd and 3rd quality classes. It allows recommending these species for sowing. Siberian larch growing on the Yegoryevsky phosphorite deposit showed a decrease in the sowing qualities of seeds (compared to the species from the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences) and the absence of relationship of seed length and width (compared to other objects of the research). Correlation analysis showed differences in linear and curvilinear relationships of seed length and width in Siberian and Sukachev's larches, as well as in Margilind larch and its parental species (European and Japanese larches). **For citation:** Bryntsev V.A., Lavrenov M.A., Kozhenkova A.A. Studying Morphological Characteristics and Sowing Qualities of Seeds of Species of the Genus *Larix* Mill. in the Conditions of Introduction. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 26–38. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-26-38

**Keywords:** larch, sowing qualities of seeds, germination, germination energy, introduction.

*Введение*

Лиственница быстро растет, устойчива к энтомовам вредителям и патогенной микрофлоре, древесина этого дерева отличается долговечностью и прочностью и используется в строительстве, а также как сырье для химической переработки [10, 17–21]. Для повышения ресурсного потенциала актуальной является интродукция лиственниц в леса европейской части России [6, 8, 12].

При интродукции древесных пород с целью введения их в культуру значительную роль играет получение жизнеспособных семян в новых экологических условиях. Выращивание растений из семян интродукционной генерации является одним из этапов акклиматизации вида [2, 9]. Успешность интродукции зависит от качества семян, при этом определение их всхожести и жизнеспособности имеет существенное значение для интродукционных работ [9, 11, 13, 15]. Помимо прочего, установление класса качества семян дает основание рекомендовать их для посева (если семена кондиционные).

Как указывает, например, Ю.П. Качанова [7], возможность широкой интродукции лиственницы часто ограничивается дефицитом семян видов и популяций, пригодных для местных условий. Один из реальных путей ликвидации дефицита – использование семян местной репродукции, т. е. из местных насаждений нужных видов и популяций.

При исследовании семян в новых климатических условиях большое значение имеет оценка их морфологических признаков и связи этих признаков. Анализ корреляционных связей дает не только новую теоретическую информацию об особенностях изменчивости признаков, но и открывает перспективы практического использования установленных закономерностей [4, 15, 16].

Актуальность исследований обусловлена также тем, что центр европейской части России подвергается высокой антропогенной нагрузке. Растительность в пределах городов отличается большой модификационной изменчивостью, которая проявляется во многих биологических показателях, на что указывали, например, Д.М. Бронникова и Н.В. Шахринова [1]. Изучение морфологических характеристик растений в данных условиях, в том числе таких ценных интродуцентов, как представители рода *Larix* Mill., имеет огромное хозяйственное значение. Зная особенности видов, можно смягчить давление антропогенных факторов путем посадки растений с широким диапазоном нормы реакции [1].

Изменчивость морфологических признаков семян культур лиственниц, интродуцированных в центр европейской части России, изучена слабо. Кроме того, в ГОСТ 13056.6–97 об определении всхожести семян нет рекомендаций для лиственниц американской, принца Рупрехта и гибридных лиственниц. В ГОСТ 14161–86 об определении класса качества семян не упоминается о лиственницах американской и принца Рупрехта. Таким образом, для дальнейшей интродукции данных растений необходимо составление рекомендаций по определению посевных качеств этих видов.

Цель работы – исследование морфологических признаков и посевных качеств семян видов рода *L.* Mill., которое выявляет биологические особенности видов этого рода в условиях интродукции и может стать основой для расширения их использования в центре европейской части России.

## Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются виды рода лиственница, интродуцированные в Главный ботанический сад г. Москвы (далее – ГБС), Ивантеевский дендрологический парк им. академика А.С. Яблокова (далее – Ивантеевский дендропарк) и на нарушенные земли Егорьевского месторождения фосфоритов (далее – ЕМФ):

лиственница сибирская (*L. sibirica* Ledeb.) – в ГБС с 1937 г., 133 экземпляра выращены из семян, полученных из Красноярска, Санкт-Петербурга, Горно-Алтайска, Подмосковья, зимостойкость – I, группа перспективности – I, в озеленении Москвы встречается [3];

лиственница сибирская (*L. sibirica* Ledeb.) – в ГБС с 1937 г., 133 экземпляра выращены из семян, полученных из Красноярска, Санкт-Петербурга, Горно-Алтайска, Подмосковья, зимостойкость – I, группа перспективности – I, в озеленении Москвы встречается [3];

лиственница сибирская (*L. sibirica* Ledeb.) – на землях, нарушенных открытой добычей фосфоритов (в Воскресенском районе Московской области), была посажена сеянцами, исследование культур проводили в возрасте 35–40 лет, обследовано 30 деревьев;

лиственница Сукачева (*L. sukaczewii* Dyl.) – в Ивантеевском дендропарке посажена в 1953 г., 30 экземпляров выращены из семян, полученных из Кировской области [5];

лиственница европейская (*L. decidua* Mill.) – в ГБС с 1953 г., 38 экземпляров выращены из семян, полученных из Курника (Польша), зимостойкость – I, группа перспективности – I, в озеленении Москвы встречается широко [3];

лиственница Маргилинда (*L. marschlinii* Coaz; *L. kaempferi* (Lamb.) Carr. × *L. decidua* Mill.) – является гибридом лиственницы европейской и лиственницы Кемпфера (японской), интродуцирована в ГБС г. Москвы в 1953 г., 6 экземпляров;

лиственница ольгинская (*L. olgensis* A. Henry) – интродуцирована в ГБС в 1972 г., 25 экземпляров получены с Дальнего Востока, из Пекина (Китай), зимостойкость – I, группа перспективности – II, в озеленении Москвы отсутствует [3];

лиственница принца Рупрехта (*L. principis-rupprechtii* Mayr) – интродуцирована в ГБС в 1958 г., 6 экземпляров получены из Всероссийского научно-исследовательского института лекарственных и ароматических растений (Москва), зимостойкость – I, группа перспективности – I, в озеленении Москвы не встречается [3];

лиственница японская (*L. kaempferi* (Lamb.) Carriere) – в Ивантеевском дендропарке, родина – Япония (о-в Хонсю), введена осенью в 1936 г., 3 экземпляра, зимостойкость – I, группа перспективности – II, в озеленении Москвы отсутствует [5];

лиственница американская (*L. laricina* (Du Roi) K. Koch) – интродуцирована в ГБС в 1956 г., 59 экземпляров выращены из семян, присланных из Канады и США, зимостойкость – I, группа перспективности – I, в озеленении Москвы встречается, но редко [3].

Согласно государственным стандартам определяли лабораторную всхожесть (ГОСТ 13056.6–97), жизнеспособность (ГОСТ 12039–82) и класс качества семян (ГОСТ 14161–86). Сроки оценки и учета проросших семян устанавливали по ГОСТ 13056.6–97. Посевные качества семян лиственницы принца Рупрехта определяли по рекомендациям ГОСТа, разработанным для лиственницы

Гмелина, на основании того, что лиственница Рупрехта по международной классификации является подвидом лиственницы Гмелина.

Жизнеспособность семян лиственниц устанавливали путем окрашивания зародышей. При этом использовали 0,1 %-й водный раствор индигокармина, раствор Люголя (иодистый раствор), 0,5 %-й водный раствор тетразола.

Размеры семян измеряли электронным штангенциркулем с точностью до десятых значений. Для показателей семян рассчитывали среднее арифметическое величину признака ( $X_{cp}$ ), ошибку среднего арифметического ( $m$ ), среднее квадратическое отклонение для выборки ( $\sigma$ ), коэффициент вариации ( $V$ ) и показатель точности опыта ( $P$ ). Оценку коэффициента вариации проводили по шкале изменчивости признаков С.А. Мамаева [14, 21].

При оценке связи морфологических признаков семян лиственниц была рассмотрена связь длины и ширины. Вычисления проводили по методике Н.Н. Свалова [16] для большой выборочной совокупности.

#### Результаты исследования и их обсуждение

*Изменчивость морфологических признаков.* Проведен сравнительный анализ длины (табл. 1) и ширины (табл. 3) семян. Для проверки значимости различий полученных средних величин рассчитали критерий Стьюдента  $t$  (табл. 2, 4). Табличный критерий  $t_{0,05}$  в нашем случае равен 2,0.

Таблица 1

#### Изменчивость длины семян видов рода *Larix Mill.*

Вид лиственницы	Место сбора семян	$X_{cp} \pm m$ , мм	$\sigma$ , мм	$V$ , %	$P$ , %
Сибирская	ГБС	$4,4 \pm 0,06$	0,61	14,0	1,4
	ЕМФ	$3,8 \pm 0,06$	0,66	17,3	1,2
Сукачева	Ивантеевский дендросад	$5,3 \pm 0,06$	0,56	10,6	1,1
Европейская	ГБС	$3,6 \pm 0,06$	0,55	15,3	1,5
Маргилинда	ГБС	$3,6 \pm 0,06$	0,57	16,0	1,6
Ольгинская	ГБС	$3,3 \pm 0,07$	0,49	14,8	2,1
Принца Рупрехта	ГБС	$4,1 \pm 0,06$	0,59	14,4	1,4
Японская	Ивантеевский дендросад	$3,9 \pm 0,07$	0,66	17,0	1,7
Американская	ГБС	$3,8 \pm 0,07$	0,67	17,4	1,7

Таким образом, наибольшей длиной семян обладают лиственницы Сукачева (5,3 мм) и сибирская (4,4 мм). Однако стоит отметить, что лиственница сибирская на нарушенных землях ЕМФ имеет более низкие значения длины семян – 3,8 мм. Наименьшая длина семян у лиственницы ольгинской – 3,3 мм. Средняя длина семян лиственницы Маргилинда оказалась равной длине семян ее родительского вида – лиственницы европейской (3,6 мм).

Таблица 2

**Расчетные значения критерия достоверности различий средней длины семян  
лиственниц**

Вид лиственницы (место сбора семян)	Сибир- ская (ЕМФ)	Сукачева (Иванте- евский ден- дросад)	Евро- пейская (ГБС)	Марги- линда (ГБС)	Ольгин- ская (ГБС)	Принца Рупрехта (ГБС)	Япон- ская (ГБС)	Амери- канская (ГБС)
Сибирская (ГБС)	<b>7,1</b>	<b>10,6</b>	<b>9,4</b>	<b>9,4</b>	<b>11,9</b>	<b>3,5</b>	<b>5,4</b>	<b>6,5</b>
Сибирская (ЕМФ)		<b>16,3</b>	<b>2,4</b>	<b>2,4</b>	<b>5,4</b>	<b>3,5</b>	1,1	0
Сукачева (Иван- теевский дендро- сад)			<b>20,0</b>	<b>20,0</b>	<b>21,7</b>	<b>14,1</b>	<b>15,2</b>	<b>16,3</b>
Европейская (ГБС)				0	<b>3,3</b>	<b>5,9</b>	<b>3,3</b>	<b>2,2</b>
Маргилинда (ГБС)					<b>3,3</b>	<b>5,9</b>	<b>3,3</b>	<b>2,2</b>
Ольгинская (ГБС)						<b>8,7</b>	<b>6,1</b>	<b>5,1</b>
Принца Рупрехта (ГБС)							<b>2,2</b>	<b>3,3</b>
Японская (ГБС)								1,0

Примечание: Полу жирным шрифтом представлены значения, показывающие достоверные различия между выборками при 5 %-м уровне значимости (здесь и в табл. 4).

Вычисленные значения критерия Стьюдента подтвердили схожесть семян лиственницы Маргилинда и лиственницы европейской, при этом отличия от другого родительского вида – лиственницы японской – достоверны. Стоит отметить, что по длине семян достоверно отличаются лиственница сибирская, произрастающая в ГБС, и тот же вид на ЕМФ. Лиственница Сукачева также имеет достоверные отличия от лиственницы сибирской. Наиболее достоверные отличия проявились между лиственницами Сукачева и ольгинской. При этом недостоверными оказались отличия лиственницы сибирской, произрастающей на ЕМФ, от лиственниц японской и американской.

Таблица 3

**Изменчивость ширины семян видов рода *Larix* Mill.**

Вид лиственницы	Место сбора семян	$X_{cp} \pm m$ , мм	$\sigma$ , мм	V, %	P, %
Сибирская	ГБС	$2,7 \pm 0,04$	0,39	14,6	1,5
	ЕМФ	$2,6 \pm 0,05$	0,49	18,9	1,9
Сукачева	Ивантеевский дендросад	$3,7 \pm 0,05$	0,53	14,4	1,4
Европейская	ГБС	$2,3 \pm 0,05$	0,46	20,3	2,0
Маргилинда	ГБС	$2,1 \pm 0,05$	0,55	25,7	2,6
Ольгинская	ГБС	$1,8 \pm 0,07$	0,46	26,4	3,7
Принца Рупрехта	ГБС	$2,5 \pm 0,06$	0,60	23,8	2,4
Японская	ГБС	$2,8 \pm 0,05$	0,53	18,9	1,9
Американская	ГБС	$2,3 \pm 0,05$	0,45	20,1	2,0

По ширине семян лиственница Сукачева обладает наилучшими показателями (3,7 мм). У лиственницы сибирской по средней ширине семян примерно одинаковые показатели как в ГБС (2,7 мм), так и на ЕМФ (2,6 мм). При этом схожая средняя ширина семян оказалась у лиственниц европейской и американской, а лиственница Маргилинда уступает родительским видам по данному признаку. Наименьшая ширина семян у лиственницы ольгинской.

Индивидуальная изменчивость по ширине семян у большинства видов выше, чем по длине семян, это указывает на длину семени как на более стабильный признак.

Таблица 4

**Расчетные значения критерия достоверности различий средней ширины семян лиственниц**

Вид лиственницы (место сбора семян)	Сибирская (ЕМФ)	Сукачева (Ивантевский дендросад)	Европейская (ГБС)	Маргилинда (ГБС)	Ольгинская (ГБС)	Принца Рупрехта (ГБС)	Японская (ГБС)	Американская (ГБС)
Сибирская (ГБС)	1,6	15,6	6,2	9,4	11,2	2,8	1,6	6,2
Сибирская (ЕМФ)		15,6	4,2	7,1	9,3	1,3	2,8	4,2
Сукачева (Ивантевский дендросад)			19,8	22,6	22,1	15,4	12,7	19,8
Европейская (ГБС)				2,8	5,8	2,6	7,1	0
Маргилинда (ГБС)					3,5	5,1	9,9	2,8
Ольгинская (ГБС)						7,6	11,6	5,8
Принца Рупрехта (ГБС)							3,8	2,6
Японская (ГБС)								7,1

Результаты исследования выявили недостоверные отличия ширины семян у лиственницы сибирской, произрастающей в ГБС, и у лиственницы сибирской на техногенных ландшафтах ЕМФ, что может указывать на более выраженную генетическую детерминацию данного признака. При этом лиственница сибирская из ГБС недостоверно отличается от лиственницы японской, а лиственница сибирская на ЕМФ имеет недостоверные отличия от лиственницы принца Рупрехта. По данному признаку схожи лиственницы европейская и американская. Наиболее проявились отличия лиственницы Сукачева от лиственниц ольгинской и Маргилинда.

Таким образом, сравнение ширины семян вновь выявило сходство разных по таксономическому статусу представителей рода *L. Mill.*

*Оценка показателей связи морфологических признаков семян.* Рассматривали корреляционные связи длины и ширины семян различных видов рода *L. Mill.* Для оценки формы связи, сопоставили значения прямолинейного и криволинейного коэффициентов корреляции. В табл. 5 представлены расчетные значения коэффициента корреляции ( $r$ ), корреляционного отноше-

ния ( $\eta$ ), критериев Стьюдента ( $t_r$ ,  $t_\eta$ ) ошибки коэффициента корреляции ( $S_r$ ) и корреляционного отношения ( $S_\eta$ ), а также мера и критерий криволинейности ( $\kappa$  и  $t_\kappa$ ), ошибка меры ( $S_\kappa$ ).

Таблица 5

## Оценка связи морфологических признаков лиственниц

Вид лиственницы (район исследования)	$r$	$\eta$	$S_r$	$S_\eta$	$t_r$	$t_\eta$	$S_\kappa$	$\kappa$	$t_\kappa$
Сибирская (ГБС)	0,23	0,34	0,10	0,09	2,42	3,83	0,05	0,06	1,33
Сибирская (ЕМФ)	-0,06	0,41	0,06	0,05	0,95	7,78	0,04	0,16	3,83
Сукачева (Ивантеевский дендросад)	0,52	0,59	0,07	0,07	7,09	9,01	0,05	0,08	1,48
Европейская (ГБС)	0,53	0,56	0,07	0,07	7,33	8,12	0,04	0,03	0,93
Маргилинда (ГБС)	0,36	0,47	0,09	0,08	4,12	6,00	0,06	0,09	1,64
Ольгинская (ГБС)	0,26	0,38	0,13	0,12	1,96	3,08	0,07	0,07	1,03
Принца Рупрехта (ГБС)	0,36	0,48	0,09	0,08	4,12	6,21	0,06	0,10	1,74
Японская (ГБС)	0,58	0,65	0,07	0,06	8,82	11,16	0,05	0,08	1,49
Американская (ГБС)	0,61	0,63	0,06	0,06	10,05	10,81	0,03	0,02	0,83

Таким образом, при оценке тесноты прямолинейной связи установлена слабая связь у лиственницы сибирской на ЕМФ ( $r = -0,06$ ) и в ГБС ( $r = 0,23$ ), а также у лиственницы ольгинской ( $r = 0,26$ ); умеренная связь – у лиственниц Маргилинда ( $r = 0,36$ ) и принца Рупрехта ( $r = 0,36$ ); значительная – у лиственниц Сукачева ( $r = 0,52$ ), европейской ( $r = 0,53$ ), японской ( $r = 0,58$ ) и американской ( $r = 0,61$ ).

При оценке тесноты криволинейной связи выявлена умеренная связь у лиственницы сибирской в ГБС ( $r = 0,34$ ), лиственницы ольгинской ( $r = 0,38$ ), лиственницы сибирской на ЕМФ ( $r = 0,41$ ), лиственницы Маргилинда ( $r = 0,47$ ) и лиственницы принца Рупрехта ( $r = 0,48$ ); значительная связь – у лиственниц европейской ( $r = 0,56$ ), Сукачева ( $r = 0,59$ ), американской ( $r = 0,63$ ) и японской ( $r = 0,65$ ).

У лиственницы Сукачева, самостоятельность которой от лиственницы сибирской по видовому статусу до сих пор под вопросом, выявлены отличия в показателях прямолинейной и криволинейной связей длины и ширины семян.

У лиственницы Маргилинда обнаружено снижение показателей связи признаков по сравнению с родительскими видами. Так, у лиственницы Маргилинда установлены умеренные прямолинейная и криволинейная связи, в то время как у лиственниц европейской и японской эти связи значительные.

Связь во всех случаях прямая, т. е. при увеличении длины семян пропорционально ей увеличивается ширина. Исключением является лиственница сибирская, произрастающая на ЕМФ, у которой  $r = -0,06$ , что указывает на отсутствие прямолинейной связи между данными признаками.

Если  $t_r$  и  $t_\eta$  выше табличного значения  $t_{0,05} = 2,0$ , то показатели  $r$  и  $\eta$  и данные связи проявляются также и в генеральной совокупности, что наблю-

дается у большинства исследованных нами лиственниц, исключением является показатель прямолинейной связи у лиственницы сибирской на ЕМФ и лиственницы ольгинской.

При переходе порога  $t_k$  (в нашем случае  $t = 2,0$ ) связь перестает считаться прямолинейной, как, например, у лиственницы сибирской, произрастающей на ЕМФ. У остальных объектов исследования связь прямолинейная.

*Посевные качества семян.* В ГОСТ 13056.6–97 нет рекомендаций для лиственниц американской, принца Рупрехта и гибридных лиственниц. В связи с чем при определении посевных качеств семян лиственниц американской и Маргилинда необходимо было использовать те рекомендации ГОСТов, которые бы лучше всего подходили для этих растений.

В целях решения данной задачи сравнили динамику прорастания семян названных выше лиственниц и лиственниц сибирской, Сукачева, европейской, ольгинской, японской и принца Рупрехта (рис. 1).

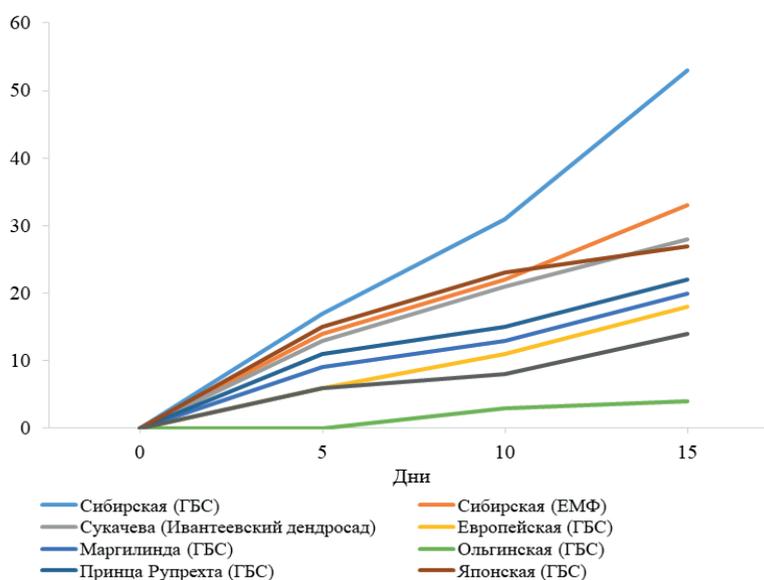


Рис. 1. Динамика прорастания семян лиственниц, %

Fig. 1. Dynamics of larch seed germination, %

Анализ графика показывает, что лиственница Маргилинда по динамике прорастания семян более схожа – из двух родительских видов – с лиственницей европейской, чем с лиственницей японской; лиственница американская также проявила наибольшее сходство по этому показателю с лиственницей европейской (среди всех объектов исследования). Данное наблюдение может служить доводом в пользу использования рекомендаций ГОСТ 13056.6–97 по определению всхожести семян лиственницы европейской для лиственниц американской и Маргилинда.

Результаты определения всхожести и энергии прорастания семян лиственниц представлены на рис. 2. Всхожесть семян лиственниц американской и Маргилинда учитывали в те же дни, которые ГОСТ рекомендует для лиственницы европейской.

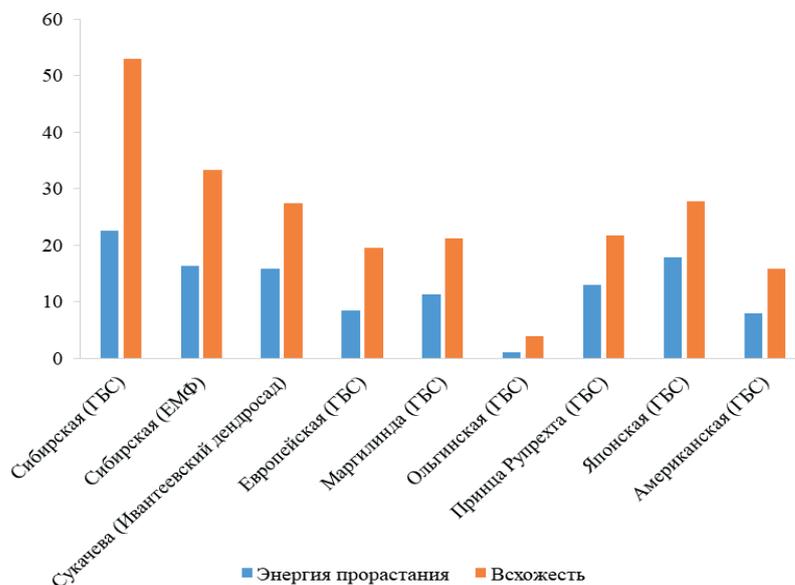


Рис. 2. Всхожесть и энергия прорастания семян лиственниц, %

Fig. 2. Germination and germination energy of larch seeds, %

Выявлено, что наилучшей всхожестью обладают семена лиственницы сибирской (53 %) из ГБС. Семена лиственницы сибирской, полученные из ЕМФ, показали по сравнению с первыми значительно более низкую всхожесть (33,3 %), однако при этом они дают более высокие результаты, чем другие виды. Наименьшая всхожесть отмечена у семян лиственницы ольгинской (4 %).

Проведены исследования по определению жизнеспособности семян интродуцированных видов лиственниц разными методами (табл. 6).

Результаты определения жизнеспособности семян разными методами достаточно близки, а средние значения жизнеспособности оказались практически идентичными результатам по всхожести.

При определении класса качества семян использованы результаты по всхожести и жизнеспособности. Классы качества семян лиственниц американской и Маргилинда установлены на основании рекомендаций по лиственнице европейской, поскольку эти виды наиболее сходны с ней по динамике прорастания семян. Семян с наилучшим, 1-м классом, не выявлено. Стоит отметить, что у семян лиственницы сибирской, произрастающей на нарушенных землях ЕМФ, класс качества ниже по сравнению с семенами данного вида, произрастающего в ГБС. Ко 2-му классу качества относятся семена лиственниц сибирской, европейской и принца Рупрехта, произрастающих в ГБС. 3-й класс установлен у семян лиственницы сибирской на ЕМФ, а также у лиственниц Сукачева, Маргилинда, японской и американской. Некондиционные семена выявлены у лиственницы ольгинской.

Таблица 6

## Жизнеспособность семян лиственниц

Вид лиственницы (район исследования)	Раствор	Жизнеспособность, %	Средняя жизнеспособность, %
Сибирская (ГБС)	Индигокармин	53	55,0
	Раствор Люголя	58	
	Тетразол	54	
Сибирская (ЕМФ)	Индигокармин	33	36,3
	Раствор Люголя	36	
	Тетразол	40	
Сукачева (Иванте- евский дендросад)	Индигокармин	28	27,3
	Раствор Люголя	29	
	Тетразол	25	
Европейская (ГБС)	Индигокармин	22	22,0
	Раствор Люголя	25	
	Тетразол	19	
Маргилинда (ГБС)	Индигокармин	28	25,3
	Раствор Люголя	23	
	Тетразол	25	
Ольгинская (ГБС)	Индигокармин	9	5,7
	Раствор Люголя	3	
	Тетразол	5	
Принца Рупрехта (ГБС)	Индигокармин	23	22,7
	Раствор Люголя	24	
	Тетразол	21	
Японская (ГБС)	Индигокармин	26	30,3
	Раствор Люголя	31	
	Тетразол	34	
Американская (ГБС)	Индигокармин	19	18,7
	Раствор Люголя	15	
	Тетразол	22	

## Заключение

Результаты исследования семян видов рода *Larix* Mill. для центра европейской части России более полно раскрывают биологические особенности этих видов в условиях интродукции.

Наименьшие размеры семян оказались у лиственницы ольгинской (1,8 × 3,3 мм), при этом у данного вида выявлена и худшая всхожесть – всего 4 %. У лиственницы Маргилинда параметры семян (2,1 × 3,6 мм) меньше по сравнению с родительскими видами – лиственницами европейской (2,3 × 3,6 мм) и японской (2,8 × 3,9 мм).

Длина семян лиственницы сибирской, произрастающей на Егорьевском месторождении фосфоритов, меньше по сравнению с семенами деревьев данного вида, интродуцированного в Главном ботаническом саду РАН, однако

различия ширины семян здесь незначимы. При этом всхожесть семян на Егорьевском месторождении фосфоритов оказалась ниже на 37,2 %, а жизнеспособность – на 34 %, что, видимо, вызвано более плохими условиями произрастания.

Установлена разная степень тесноты связей длины и ширины семян у видов рода *L. Mill.* Полученные отличия в показателях связи листовенниц сибирской и Сукачева могут свидетельствовать о разных биологических особенностях семян данных растений, что подтверждает их обособленность друг от друга.

Выявлены отличия гибридной листовенницы Маргилинда от родительских видов по показателям связи. Коэффициент корреляции длины и ширины семян у этого дерева ниже ( $r = 0,36$ ), чем у листовенниц европейской ( $r = 0,53$ ) и японской ( $r = 0,58$ ). Что объясняется более высокой изменчивостью морфологических признаков семян в гибридном потомстве и, как следствие, ослаблением связи между данными показателями.

У всех объектов исследования, кроме листовенницы сибирской на Егорьевском месторождении фосфоритов, выявлены прямолинейные связи длины и ширины семян. Данный вывод важен в том числе в практических целях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бронникова Д.М., Шахринова Н.В. Корреляционный анализ количественных признаков хвои сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. // Приволж. науч. вестн. 2016. № 4(56). С. 5–7. Bronnikova D.M., Shakhrianova N.V. Correlation Analysis of Quantitative Traits of Pine Needles Scotch Pine *Pinus sylvestris* L. *Privolzhskiy nauchniy vestnik*, 2016, no. 4(56), pp. 5–7.
2. Брынцев В.А., Храмова М.И. Изменчивость семенного потомства сосны кедровой сибирской при интродукции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 6. С. 38–49. Bryntsev V.A., Khramova M.I. Variability of Seed Progeny of Siberian Pine at Introduction. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 6, pp. 38–49. URL: [http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/759/lh\\_4\\_6\\_2013.pdf](http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/759/lh_4_6_2013.pdf)
3. Древесные растения Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН: 60 лет интродукции / отв. ред. А.С. Демидов; Гл. ботан. сад им. Н.В. Цицина. М.: Наука, 2005. 586 с. *Woody Plants of the Main Botanical Garden Named after N.V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences: 60 Years of Introduction*. Ed. by A.S. Demidov. Moscow, Nauka Publ., 2005. 586 p.
4. Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с. Zaytsev G.N. *Mathematical Statistics in Experimental Botany*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 424 p.
5. Ивантеевский дендрологический сад ВНИИЛМ: каталог / сост. А.С. Яблоков, М.И. Докучаева; науч. ред. Н.В. Котелова. М., 1976. 88 с. *Ivanteevsky Dendrological Garden of VNIILM (Catalogue)*. Content by A.S. Yablokov, M.I. Dokuchaeva; ed. by N.V. Kotelova. Moscow, 1976. 88 p.
6. Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмоскovie путем интродукции листовенницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2009. 20 с. Karasev N.N. *Increasing the Productivity of Forests in the Moscow Region through the Introduction of Larch*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 20 p.
7. Качанова Ю.П. Исследование особенностей семеношения листовенниц в условиях северо-запада России // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 5(73). С. 32. Kachanova Yu.P. Studying the Features of Larch Seed Formation in the North-West of Russia. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii* [Modern scientific researches and innovations], 2017, no. 5(73), p. 32.

8. Коженкова А.А., Мерзленко М.Д. Дальневосточные лиственницы как ценный генофонд для интродукции в центр Русской равнины // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017. № 49. С. 99–101. Kozhenkova A.A., Merzlenko M.D. Far Eastern Larch as a Valuable Genofond for Introduction into the Center of the Russian Plain. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2017, no. 49, pp. 99–101.
9. Логунов Д.В. Экологические особенности роста и развития представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в условиях антропогенных ландшафтов Нижегородской области: дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2002. 287 с. Logunov D.V. *Ecological Features of Growth and Development of Representatives of the Genus Larch (Larix Mill.) in the Anthropogenic Landscapes of the Nizhny Novgorod Region*: Cand. Biol. Sci. Diss. Nizhny Novgorod, 2002. 287 p.
10. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Глазунов Ю.Б., Коженкова А.А., Перевалова Е.А. Результаты изучения географических посадок сосны и лиственницы в Серебряноборском опытном лесничестве // Лесн. вестн. 2020. Т. 24. № 6. С. 34–43. Merzlenko M.D., Melnik P.G., Glazunov Yu.B., Kozhenkova A.A., Perevalova E.A. Study Results of Pine and Larch Provenance Trial in Serebryanoborsky Experimental Forest District. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2020, vol. 24, no. 6, pp. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-34-43>
11. Некрасов В.И. Основы семеноведения древесных растений при интродукции. М.: Наука, 1973. 279 с. Nekrasov V.I. *Fundamentals of Seed Science of Woody Plants during Introduction*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 279 p.
12. Орнатский А.Н. Обогащение лесных ресурсов республики Мордовия посредством интродукции лиственницы сибирской: дис. ... канд. биол. наук. Йошкар-Ола, 2002. 223 с. Ornatskiy A.N. *Enrichment of Forest Resources of the Republic of Mordovia through the Introduction of Siberian Larch*: Cand. Biol. Sci. Diss. Yoshkar-Ola, 2002. 223 p.
13. Плотникова Л.С. Научные основы интродукции и охраны древесных растений флоры СССР. М.: Наука, 1988. 262 с. Plotnikova L.S. *Scientific Basis for the Introduction and Preservation of Woody Plants of the Flora of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 262 p.
14. Погиба С.П., Курносов Г.А., Казанцева Е.В. Методы количественной генетики в лесной селекции. М.: МГУЛ, 1999. 31 с. Pogiba S.P., Kurnosov G.A., Kazantseva E.V. *Methods of Quantitative Genetics in Forest Breeding*. Moscow, MSFU Publ., 1999. 31 p.
15. Путенихина К.В., Шигапов З.Х., Мкртчян М.А., Путенихин В.П. Корреляции количественных показателей шишек и семян кедра сибирского при интродукции // Хвойные бореальной зоны. 2015. № 1-2. С. 48–54. Putenikhina K.V., Shigapov Z.Kh., Mkrtychyan M.A., Putenikhin V.P. Correlations of Quantitative Values of Cones and Seeds in Introduced Siberian Stone Pine. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2015, no. 1-2, pp. 48–54.
16. Свалов Н.Н. Вариационная статистика. М.: МЛТИ, 1983. 79 с. Svalov N.N. *Variation Statistics*. Moscow, MLTI Publ., 1983. 79 p.
17. Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с. Timofeev V.P. *Forest Plantations of Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 216 p.
18. Abaimov A.P., Barzut V.M., Berkutenko A.N., Buitink J., Martinsson O., Milyutin L.I., Polezhaev A., Putenikhin V.P., Takata K. Seed Collection and Seed Quality of *Larix* spp. from Russia: Initial Phase on the Russia-Scandinavian Larch Project. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2002, no. 4, pp. 39–49.
19. Blondal S., Snorrason A. The Role of *Larix* in Icelandic Forestry. *Ecology and Management of Larix Forests: A Look Ahead: Proceeding of an International Symposium*. Montana, IUFRO, 1995, pp. 220–226.
20. Fedorkov A. Stem Growth and Quality of Six Provenances of *Larix sukaczewii* Dyl. and *Larix sibirica* Ledeb. in a Field Trial Located in North-West Russia. *Baltic Forestry*, 2017, vol. 23, no. 3(46), pp. 603–607.
21. Gradel A., Ganbaatar B., Nadaldorj O., Dovdondemberel B., Kusbach A. Climate-Growth Relationships and Pointer Year Analysis of a Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) Chronology from the Mongolian Mountain Forest Steppe Compared to White Birch (*Betula platyphylla* Sukaczew). *Forest Ecosystems*, 2017, vol. 4, art. 22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0110-2>

УДК 630\*182.22

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-39-49

## ОСОБЕННОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ ЕЛОВЫХ ФОРМАЦИЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТАЙГИ РОССИИ

*В.Г. Стороженко, д-р биол. наук; ResearcherID: J-1460-2016.*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7254-9161>*

Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл., Россия, 143030; e-mail: root@ilan.ras.ru, lesoved@mail.ru

---

*Оригинальная статья / Поступила в редакцию 09.04.20 / Принята к печати 20.08.20*

---

**Аннотация.** Подняты проблемы изучения структуры коренных разновозрастных лесов как эталонов устойчивых лесных формаций. Цель исследований – определение закономерностей формирования горизонтальной структуры коренных девственных ельников подзон северной, средней и южной тайги Европейской России, при этом характер горизонтальной структуры рассматривается как один из важнейших признаков устойчивости лесных сообществ, сформировавшейся в ходе эволюции. В качестве объектов исследований приняты коренные девственные ельники в каждой из подзон тайги Европейской России. В подзоне северной тайги – ельники Северодвинского лесхоза Архангельской области; в подзоне средней тайги – ельники резервата «Вепский лес»; в подзоне южной тайги – ельники Центрально-Лесного биосферного заповедника. В биогеоценозах закладывали пробные площади, на которых изучали возрастные, горизонтальные, патологические характеристики ельников. Проводили сплошное бурение деревьев с определением их возраста и пораженности дереворазрушающими грибами биотрофного комплекса. На планах пробных площадей выделяли мозаики возрастных поколений, вычисляли площадь каждой из них, объем деревьев в мозаиках и однородность по возрастному признаку, количество естественного возобновления. Коренные ельники тайги европейской части России имеют сложное строение и разное количество возрастных поколений в составе, а также различные динамические показатели биогеоценозов. Все ельники характеризуются мозаичным расположением деревьев, объединенных в возрастные поколения, произрастающие на неодинаковой по размеру площади и отличающиеся неодинаковой степенью однородности по возрастному показателю. Это определяет сложную возрастную, горизонтальную и вертикальную структуру биогеоценозов – важнейшее условие устойчивости лесных сообществ. Учеты естественного возобновления ели выявили значительные различия в количестве подроста в ельниках разных подзон тайги, что объясняется разнообразием горизонтальных структур таких лесов. Соотношение количества подроста ели на разлагающихся стволах древесного опада и на поверхности почвы следующее: количество подроста высотой 0,5 м и в тех и в других условиях произрастания почти одинаковое, количество подроста высотой более 3 м на стволах валежа меньше по сравнению с количеством подроста этой категории высоты на почве.

**Для цитирования:** Стороженко В.Г. Особенности горизонтальной структуры лесов еловых формаций европейской тайги России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 39–49. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-39-49

**Ключевые слова:** коренные еловые леса, мозаики возрастных поколений, естественное возобновление ели, устойчивость лесных сообществ, европейская тайга России.

---

**FEATURES OF THE HORIZONTAL STRUCTURE OF FORESTS OF SPRUCE FORMATIONS IN THE EUROPEAN TAIGA OF RUSSIA**

*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 RAS, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Odintsovsky District, Moscow Region, 143030, Russian Federation; e-mail: root@ilan.ras.ru, lesoved@mail.ru

---

**Original article** / Received on April 9, 2020 / Accepted on August 20, 2020

---

**Abstract.** The article highlights the issues of studying the structure of indigenous forests of different ages as a model of sustainable forest formations. The research purpose is to study the patterns of horizontal structure formation of indigenous virgin spruce forests of the northern, middle and southern taiga subzones of European Russia. We consider the nature of the horizontal structure as one of the most important signs of sustainability of forest communities developed over the evolution. Indigenous virgin spruce forests in each of the taiga subzones of European Russia were adopted as research objects: spruce forests of the Severodvinsk forestry of the Arkhangelsk region in the northern taiga subzone; spruce forests of the Vepsky forest reserve in the middle taiga subzone; spruce forests of the Central Forest Nature Reserve in the southern taiga subzone. Sample plots were laid out in biogeocenoses, where we studied the age, horizontal, and pathological characteristics of spruce forests. Continuous tree drilling was carried out to determine the age of trees and their infestation by wood-destroying fungi of the biotrophic complex. The mosaics of age generations were identified on the plans of sample plots; the area of each of them, the volume of trees in the mosaics and the homogeneity by age, and the amount of natural regeneration were determined. Indigenous spruce fir forests of the taiga of European Russia have a different age structure with a different number of age generations in the age series and various dynamic indicators of biogeocenoses. All of them have a mosaic arrangement of trees grouped by different age generations, growing in different sized areas and distinguished by an unequal degree of homogeneity in terms of age. This defines a complex age horizontal and vertical structure of biogeocenoses; the most important condition for sustainability of forest communities. Accounting of spruce natural regeneration showed significant differences in the number of undergrowth in spruce forests of different taiga subzones, which refers to a variety of horizontal structures of such forests. The ratio of the number of spruce undergrowth growing on decaying trunks of woody debris and on the ground is as follows: the number of 0.5 m high undergrowth in both growing conditions is almost equal, the number of over 3 m high undergrowth on deadwood trunks is less compared to the number of undergrowth of this height category on the ground.

**For citation:** Storozhenko V.G. Features of the Horizontal Structure of Forests of Spruce Formations in the European Taiga of Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 39–49. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-39-49

**Keywords:** indigenous spruce forests, mosaics of age generations, natural regeneration of spruce, sustainability of forest communities, European taiga of Russia.

### *Введение*

В настоящее время в сформированных в длительной эволюционной динамике коренных лесных экосистемах бореальных лесов ведутся масштабные лесозаготовительные работы. Это приводит (в местах осуществления сплошных вырубок) к замене таких лесов производными лесными сообществами

как естественного, так и искусственного происхождения. Остается все меньше возможностей для изучения фундаментальных закономерностей совместного функционирования консортов разных ценотических и таксономических уровней лесных биогеоценозов, выработанных тысячелетиями развития биоты. Основные усилия лесной науки сосредоточены на разработке методов создания искусственных древостоев и выращивании максимальных объемов древесной биомассы в кратчайшие сроки. При этом зачастую практически не учитываются доказанные и лежащие в основе филогенеза лесных сообществ законы их устойчивого функционирования. С течением времени такой разрыв становится все более ощутимым. Коренные девственные леса сейчас можно встретить только в труднодоступных для заготовительной техники местах, далеко не во всех заповедниках, национальных парках и географически удаленных природных территориях Севера.

Вместе с тем в период, когда с применением тяжелой техники на огромных территориях вырубается коренные леса, особенно в европейской части России, проблемы изучения структур коренных разновозрастных биогеоценозов продолжают находиться в сфере внимания ученых как в нашей стране, так и за рубежом [1, 2, 4, 5, 7–9, 11, 16–19, 21, 24, 26]. Чем напряженнее становится ситуация с сокращением площадей коренных лесов, тем острее встают проблемы изучения закономерностей эволюционного формирования лесных экосистем. В этой связи значительный объем наших работ посвящен исследованию структур коренных девственных лесов европейской тайги России (например, [13, 14]), в частности мозаичной структуре разновозрастных лесов.

Цель работы – изучить особенности горизонтальных структур коренных девственных ельников подзон северной, средней и южной тайги Европейской России как важнейшие выработанные эволюцией характеристики устойчивости лесных сообществ.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследований стали коренные девственные ельники в каждой из подзон тайги Европейской России. В подзоне северной тайги – ельники Северодвинского лесничества Архангельской области; в подзоне средней тайги – ельники резервата «Вепский лес»; в подзоне южной тайги – ельники Центрально-Лесного биосферного заповедника. В не затронутых антропогенными воздействиями девственных биогеоценозах наиболее производительных условий произрастания ельников для каждой подзоны закладывали постоянные пробные площади (ПП), на которых проводили цикл работ по изучению параметров древостоев: лесоводственных (возрастных, горизонтальных), патологических (пораженность деревьев грибами дереворазрушающего комплекса). Состав работ включал в себя нумерацию деревьев всех пород на территории участков; разбивку площади на квадраты 10×10 м для удобства картирования деревьев, древесного опада, пораженности деревьев и размещения естественного возобновления; сплошное бурение деревьев у шейки корня возрастным буром Пресслера в целях фиксации их возраста и наличия гнилей разных типов и развития; картирование расположения деревьев и стволов древесного опада с определением стадий его разложения [13]. В камеральный период устанавливали возрастную структуру древостоев [2, 4, 5, 7, 11] и их динамические

характеристики [5]. К первому поколению относили деревья с предельными для породы возрастными, последнее поколение включало деревья подроста толщиной до 4 см на высоте груди возрастом до 80 лет (одно или два возрастных поколения). На планах ПП выделяли мозаики деревьев, относящихся к различным возрастным поколениям, устанавливали их площадь и однородность (чистоту) [10, 14]. Для древостоя каждой ПП по высоте и диаметру вычисляли фактический запас по разрядам высот: южная подзона – II разряд, средняя подзона – III разряд, северная подзона – IV разряд высот. Определяли объем ( $m^3/га$ ) деревьев в мозаиках возрастных поколений и стволов древесного отпада [15]. Чтобы перевести объем деревьев в фитомассу, использовали конверсионные коэффициенты для основных лесобразующих пород [6]: коэффициент конверсии ели северной тайги (1-я широтная полоса) составляет  $0,750 \pm 0,039$ , ели средней и южной тайги (2-я широтная полоса) –  $0,681 \pm 0,030$ . Фиксировали состав и количество естественного возобновления как начальной структуры возрастного ряда древостоев [3].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Структуры коренных девственных лесных сообществ, не подвергающихся никаким антропогенным воздействиям и не испытывающих стрессовых эндогенных воздействий, формируются под влиянием факторов естественного конкурентного отбора растений фитоценоза и деятельности организмов гетеротрофного деструктивного комплекса, определенных эволюцией на дозированный отбор растений из состава фитоценоза в соответствии с динамическими характеристиками лесного сообщества. Эта общая для лесов эволюционного развития парадигма является основным законом формирования коренных лесных сообществ любых формаций и сукцессионного движения их к состоянию климакса [17–19, 24].

В исследованиях в качестве объекта фитоценоза приняты древостои, а в качестве гетеротрофного консорта – дереворазрушающие грибы биотрофного комплекса, поражающие живые деревья, и грибы ксилотрофного комплекса, разлагающие древесный отпад.

Объемы отпада деревьев определяются возрастной структурой древостоев, т. е. распределением деревьев по возрастным поколениям, и активностью грибов биотрофного комплекса. Грибы поражают живые деревья, вызывают гнили стволов и корней, способствуют переводу деревьев в структуру валежа, составляющего значительную часть общей мортмассы лесного сообщества. Таким образом, прежде всего необходимо описать возрастные структуры принятых к изучению древостоев (табл. 1).

Представленные в таблице биогеоценозы имеют абсолютно разновозрастное строение древостоев, но находятся на разных этапах сукцессионного развития (фазах динамики), что определяется объемом деревьев в возрастных поколениях. Фаза дигрессии древостоя 1 обусловлена большим объемом деревьев в поколениях старшего возраста, это гарантирует и значительный объем древесного отпада по крайней мере из трех первых возрастных поколений – от 240 до 360 лет. Древостой 3 отнесен к демулационной фазе динамики: наибольший объем деревьев сосредоточен в молодых по сравнению с остальными возрастными поколениями. По утверждению И.И. Гусева [4], в фазе климакса находится древостой, в котором наибольший объем деревьев приходится на середину возрастного ряда древостоя – в нашем случае это древостой 2.

Таблица 1

## Возрастные структуры коренных еловых древостоев тайги Европейской России

№ ПП	Лесоводственная характеристика: состав; тип леса; бонитет; полнота; запас, м <sup>3</sup> /га; размер ПП, га; фаза динамики	Показатели	Возрастные поколения							
			До 80	81–120	121–160	161–200	201–240	241–280	281–320	321–360
1	10Е+С,Б; бр-чер; IV; 0,6; 170,0; 0,2; Дг	Распределение запаса, м <sup>3</sup> /га / % от общего	Ед	<u>16,5</u> 9,7	<u>4,3</u> 2,5	<u>22,6</u> 13,3	<u>11,4</u> 6,7	<u>38,1</u> 22,4	<u>15,9</u> 9,4	<u>61,2</u> 36,0
		Пораженность деревьев ДРГ, %	3,0	15,7	39,3	43,5	69,5	50,0	76,8	63,2
2	10Е+Ос; майкис; II; 0,8; 361,3; 0,16; Кл	Распределение запаса, м <sup>3</sup> /га / % от общего	Ед	<u>18,0</u> 5,0	<u>104,8</u> 29,0	<u>144,5</u> 40,0	<u>57,8</u> 16,0	<u>36,2</u> 10,0	–	–
		Пораженность деревьев ДРГ, %	2,6	31,5	40,0	50,0	47,7	57,1	–	–
3	8Е1Б1Ос; кис-нем; I; 0,7; 328,4; 0,48; Дм	Распределение запаса, м <sup>3</sup> /га / % от общего	<u>3,9</u> 1,2	<u>104,8</u> 31,9	<u>86,8</u> 26,4	<u>64,0</u> 19,5	<u>68,9</u> 21,0	–	–	–
		Пораженность деревьев ДРГ, %	14,8	16,7	20,9	21,1	41,2	–	–	–

Примечание: ПП 1 расположена в Архангельской области, 2 – в резервате «Вепский лес», 3 – в Центрально-Лесном биосферном заповеднике. Бр-чер – бруснично-черничный; май-кис – майниково-кисличный; кис-нем – кислично-неморальный. Дг – дигрессивная; Кл – климаксовая; Дм – демутационная. ДРГ – дереворазрушающие грибы (биотрофный комплекс).

Можно отметить, что возрастная структура коренных девственных ельников (как и древостоев других формаций аналогичного происхождения) в каждом отдельном случае учета уникальна и не повторилась ни разу за все наши более чем 40-летние наблюдения (более 300 постоянных ПП).

Следует обратить внимание на закономерную тенденцию увеличения пораженности деревьев грибами биотрофного комплекса в возрастных поколениях от последнего (подрост) к первому (предельные возраста):  $r = 0,91$  при  $M_r = 0,28$  и  $t = 45,2$ . Эта закономерность наблюдается у древостоев всех формаций, имеющих разновозрастную структуру.

Уникальность разнообразия возрастных структур коренных ельников определяет и разнообразие их горизонтальной структуры, как в каждом отдельном биогеоценозе, так и между биогеоценозами.

Размещение деревьев разного возраста на планах ПП позволяет выделить и графически объединить в мозаики деревья, относящиеся к определенным возрастным поколениям. В зависимости от присутствия в составе мозаик

деревьев одного возрастного поколения или примеси деревьев других возрастных поколений мозаики различаются по однородности (чистоте) и обозначаются индексами от 1 (абсолютно однородные) до 0,5 (смешанные). В однородные мозаики входят деревья одного возрастного поколения, обозначаемые индексом 1. По мере прибавления деревьев из других возрастных поколений в процентном соотношении однородность мозаик снижается до 0,6. Группы деревьев с индексом менее 0,5 как мозаики не выделяются и характеризуются как абсолютно смешанные.

Расположение мозаик на планах ПП мы не приводим, поскольку общие закономерности их содержания и размещения по площади биогеоценозов одни и те же в разных мозаиках: конфигурации мозаик в ельниках любых биогеоценозов различны по площади, мозаики отличаются по однородности, пораженности дереворазрушающими грибами биотрофного комплекса и объемам деревьев в составе мозаик разных возрастных поколений.

В подтверждение приводим описание мозаик возрастных поколений древостоев, принятых для анализа ПП (табл. 2). Представленные в качестве примера древостои с различными динамическими характеристиками существенно отличаются по площади мозаик каждого возрастного поколения и по однородности деревьев разного возраста в составе мозаик.

Таблица 2

#### Характеристики мозаик древостоев пробных площадей

№ ПП	Показатели	Возрастные поколения							
		До 80	81–120	121–160	161–200	201–240	241–280	281–320	321–360
1	Площадь, га / % от площади пробы	Под-рост	0,026 13	0,004 2	0,130 65			0,040 20	
	Однородность		1,0–0,8	0,7	Менее 0,5			1,0–0,85	
2	Площадь, га / % от площади пробы	0,05 30		0,03 30	0,08 40		–		
	Однородность	Менее 0,5		1,0–0,7	0,5				
3	Площадь, га / % от площади пробы	0,03 6	0,38 80	0,04 8	0,02 4	0,01 2		–	
	Однородность	1,0–0,8	0,7–0,8	1,0–0,8	0,6–0,7		1,0		

Примечание: Древостой ПП 1 включает девять 40-летних возрастных поколений и 1-е поколение – 321–360 лет; в категорию «до 80 лет» входит два 40-летних поколения подроста.

В каждом из древостоев почти все слагающие их мозаики определенных возрастных поколений имеют разные параметры однородности. Однородные (чистые) по составу мозаики незначительных по площади размеров выделены только в двух случаях (ПП 1 и 3).

Содержание мозаик по возрастному параметру соответствует динамическим показателям биогеоценозов ПП: в древостое дигрессивной фазы динамики наибольшие площади леса сосредоточены в мозаиках старших возрастов, даже

если они неоднородны по возрастному составу, в древостое климаксовой фазы динамики максимальные площади деревьев сконцентрированы в мозаиках середины возрастного ряда; в древостое демулационной фазы – в мозаиках младших возрастов, до 120 лет.

Можно констатировать, что коренные разновозрастные еловые древостои таежной зоны по параметрам мозаик возрастных поколений имеют самые разнообразные характеристики. Такое разнообразие определяет сложную горизонтальную и, следовательно, вертикальную структуру древостоев. Это нужно рассматривать как важнейшее условие формирования устойчивости лесных сообществ.

Определенный интерес представляют данные об объеме деревьев, составляющих возрастные поколения в изучаемых древостоях. Эти данные позволяют в фактических величинах сравнить древесную биомассу мозаик в составе лесных сообществ, имеющих разные динамические показатели (табл. 3). Одновременно по объемам деревьев рассчитана фитомасса в мозаиках возрастных поколений, что дает возможность найти массы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и энергию (Q) депонированные в древесине деревьев мозаик.

Таблица 3

**Объем ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) и фитомасса ( $\text{т}/\text{га}$ ) деревьев в мозаиках возрастных поколений древостоев с разными динамическими показателями**

№ ПП	Показатели	Возрастные поколения								
		До 40	До 80	81–120	121–160	161–200	201–240	241–280	281–320	321–360
1	Объем, $\text{м}^3/\text{га}$	–	40,2	110,1				4,8	8,6	6,3
	Фитомасса, $\text{т}/\text{га}$	–	30,2	82,6				3,6	6,5	4,7
2	Объем, $\text{м}^3/\text{га}$	7,5	117,3	214,5	22,0		–			
	Фитомасса, $\text{т}/\text{га}$	5,1	79,9	146,1	15,0		–			
3	Объем, $\text{м}^3/\text{га}$	6,8	141,2	73,8	97,0	9,5	–			
	Фитомасса, $\text{т}/\text{га}$	4,6	96,2	50,3	66,1	6,5	–			

Здесь не приводится алгоритм вычисления этих показателей. Но расчет их выполнен с применением формул микогенного ксилолиза В.А. Соловьева [12] и опубликован в наших прежних работах [14 и др]. По этим же формулам определяется сток продуктов ксилолиза при разложении древесины древесного отпада (валежа). Древесный отпад как структура общей мортмассы лесных биогеоценозов занимает важное место в трофотопических цепях общего баланса биомассы лесных сообществ [13, 14, 20, 22, 23, 26].

В горизонтальных структурах коренных еловых древостоев естественное возобновление можно рассматривать как консорт, определяющий будущее строение разновозрастного сообщества, его способность к устойчивому развитию. В девственных разновозрастных ельниках возможно появление естественного возобновления ели под пологом сомкнутого древостоя благодаря его неравномерной полноте, теневыносливости ели и, как правило, куртинному или групповому размещению по площади биогеоценоза подрост ели. Количество елового подрост в коренных ельниках при естественном формировании древостоев всегда достаточное для формирования последующих поколений леса и его разновозрастной структуры.

К особенностям размещения елового подроста в горизонтальных структурах ельников можно отнести его способность к появлению и росту на разлагающихся стволах валежа. Древесный отпад в процессе ксилолиза древесины грибами дереворазрушающего комплекса ксилотрофов разлагается с выделением  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $Q$ , а также некоторого количества зольных элементов. Таким образом, на стволах валежа начиная с 3-й стадии разложения [13, 25], при которой деструктивная активность грибов и эмиссия продуктов ксилолиза древесины достигают наивысшей степени, более вероятно появление всходов подроста ели (как и сопутствующих пород), чем на поверхности почвы [20, 23]. Исходя из формулы ксилолиза древесины баланс по массе составляет:  $100$  (частей древесной массы) +  $138,2$  (частей  $\text{O}_2$ ) =  $182,6$  (частей  $\text{CO}_2$ ) +  $55,8$  (частей  $\text{H}_2\text{O}$ ) +  $19,89$  (кДж/г) [12].

В табл. 4 представлены данные о количестве подроста ели в биогеоценозах ПП с распределением по подзонам тайги и грациям высоты. В качестве примера приведены фактические результаты подсчета подроста ели на стволах валежа и на поверхности почвы ПП 3 (южная тайга). По данным А.Д. Волкова [1], в северных карельских коренных разновозрастных ельниках количество подроста составляет в среднем 4,5 тыс. шт./га при среднем возрасте подроста от 2,5 до 3,0 м более 70 лет.

Таблица 4

#### Количество подроста ели в биогеоценозах пробных площадей

№ ПП	Всего	В том числе по грациям высоты (м)					
		До 0,5	0,6–1,0	1,1–1,5	1,6–2,0	2,1–2,5	2,6–3,0
1	1988 шт./га	766	339	189	333	150	211
2	15 087 шт./га	8625	5187	876	175	118	106
3	7275 шт./га,	3488	1025	675	1075	787	225
	в том числе	1709-49	349-34	196-29	193-18	228-28	18-8
	на валеже, шт.-%	1779-51	676-66	479-71	882-82	559-72	207-92
	на почве, шт.-%						

Такие показатели, по мнению автора, характерны для коренных девственных ельников. Наши данные по среднему возрасту подроста для таких же высот практически аналогичны приведенным для Карелии. Для всех граций высот средний возраст елового подроста ельников северной тайги имеет следующие значения (лет): высота до 0,5 м –  $22 \pm 1,5$ ; 0,6–1,0 м –  $32 \pm 1,0$ ; 1,1–1,5 м –  $38 \pm 1,9$ ; 1,6–2,0 м –  $50 \pm 4,1$ ; 2,1–2,5 м –  $57 \pm 3,8$ ; более 2,5 м –  $74 \pm 5,2$ .

Данные табл. 4 показывают значительные различия количества подроста в ельниках разных подзон тайги, что объясняется разнообразием горизонтальных структур таежных ельников, в том числе разнообразием структур подроста. Прослеживается также тенденция уменьшения количества подроста по мере увеличения его высоты и перехода в категорию подгона. Соотношение подроста, растущего на стволах валежа и на поверхности почвы, такое: количество деревьев высотой до 0,5 м на стволах валежа и на почве почти равно, а на стволах валежа при высоте подроста более 3 м число подроста меньше по сравнению с числом подроста этой категории высоты на почве. Данный факт может иметь два объяснения. Во-первых, если для появления всходов ели условия разлагающейся древесины благоприятны, то с дальнейшим ростом дерева они становятся все более жесткими для формирования корневой системы подроста и ее влагообеспечен-

ности; во-вторых, стволы валежа по мере разложения постепенно теряют форму, и корневая система подроста приближается к поверхности почвы, менее богатой питательными веществами в сравнении с разлагающимся валежем.

### Выводы

1. Коренные леса еловых формаций Европейской России являются уникальными природными комплексами, сохранившими структуры и закономерности совместного функционирования консортов эволюционно сформированных лесных сообществ.

2. Все коренные еловые леса имеют разновозрастное строение и разное количество возрастных поколений в возрастных рядах, различные динамические показатели биогеоценозов.

3. По мере увеличения возраста поколений от последнего (подрост) до первого (предельные возраста для ели) увеличивается пораженность деревьев древоразрушающими грибами биотрофного комплекса.

4. Коренные еловые леса характеризуются мозаичным расположением деревьев различных возрастных поколений, занимающих разную по размеру площадь и имеющих неодинаковую степень однородности по возрастному показателю, что определяет сложную возрастную, горизонтальную, вертикальную структуру биогеоценозов – важнейшее условие формирования устойчивости лесных сообществ.

5. Учеты естественного возобновления ели как начальной структуры возрастного ряда древостоев показали значительные различия в количестве подроста в ельниках разных подзон тайги, что объясняется разнообразием горизонтальных структур таежных ельников.

6. Определены соотношения количества подроста ели, растущего на разлагающихся стволах древесного опада и на поверхности почвы. Показаны почти равные величины для подроста высотой до 0,5 м и постепенное убывание количества подроста на стволах валежа по сравнению с количеством подроста на почве к высоте более 3 м.

7. Закономерности структурного строения коренных лесов эволюционного развития по критериям разнообразия возрастных и горизонтальных структур, разновозрастности и мозаичности должны учитываться при формировании устойчивых лесов долговременного функционирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Волков А.Д. Биоэкологические основы эксплуатации ельников северо-запада таежной зоны России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 250 с. Volkov A.D. *Bioecological Basis for Exploitation of Spruce Forests of the Northwest of the Russian Taiga Zone*. Petrozavodsk, KarRC RAS, 2003. 250 p.

2. Воропанов П.В. Естественная история ельников Севера и их внутренняя структура // Сб. тр. Поволж. лесотехн. ин-та. 1949. № 6. С. 3–38. Voropanov P.V. *Natural History of Spruce Forests of the North and Their Internal Structure*. *Sbornik trudov Povolzhskogo lesotekhnicheskogo instituta*, 1949, no. 6, pp. 3–38.

3. Грязькин А.В. Возобновительный потенциал таежных лесов (на примере ельников Северо-Запада России): моногр. СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с. Gryazkin A.V. *Regeneration Potential of Taiga Forests (Case Study of Spruce Forests of the North-West of Russia)*: Monograph. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2001. 188 p.

4. Гусев И.И. Структура и особенности таксации ельников Севера. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 76 с. Gusev I.I. *Structure and Features of Inventory of Spruce Forests of the North*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 76 p.

5. Дыренков С.А. Структура и динамика таежных ельников. Л.: Наука, 1984. 176 с. Dyrenkov S.A. *Structure and Dynamics of Taiga Spruce Forests*. Leningrad, Nauka Publ., 1984. 176 p.

6. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. № 1. С. 119–127. Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Chestnykh O.V. Conversion Rates of Stand Volume to Phytomass of Main Forest-Forming Species in Russia. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo*, 2003, no. 1, pp. 119–127.

7. Ивашкевич Б.А. Девственный лес, особенности его строения и развития // Лесн. хоз-во и лесн. пром-сть. 1929. № 10. С. 36–44; № 11. С. 40–47; № 12. С. 41–46. Ivashkevich B.A. Virgin Forest, Features of Its Structure and Development. *Lesnoye khozyaystvo i lesnaya promyshlennost'*, 1929, no. 10, pp. 36–44; no. 11, pp. 40–47; no. 12, pp. 41–46.

8. 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'sky V.G., Khlebopros R.G., Buzykin A.I., Ovchinnikova T.M. Modeling of Forest-Forming Process: Phenomenological Approach. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2005, no. 1, pp. 3–11.

9. Комин Г.Е., Семечкин И.В. Возрастная структура древостоев и принципы ее типизации // Лесоведение. 1970. № 2. С. 24–33. Komin G.E., Semechkin I.V. Age Structure of Forest Stands and Principles of Its Typification. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1970, no. 2, pp. 24–33.

10. Плотников В.В. О горизонтальной структуре древесного яруса лесных сообществ // Лесоведение. 1968. № 5. С. 3–11. Plotnikov V.V. On the Horizontal Structure of the Tree Layer of Forest Communities. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1968, no. 5, pp. 3–11.

11. Побединский А.В. Сравнительная оценка одновозрастных и разновозрастных древостоев // Лесн. хоз-во. 1988. № 2. С. 40–43. Pobedinsky A.V. Comparative Assessment of Even-Aged and Uneven-Aged Stands. *Lesnoye khozyaystvo*, 1988, no. 2, pp. 40–43.

12. Соловьев В.А. Микогенный ксилолиз, его экологическое и технологическое значение // Научные основы устойчивости лесов к дереворазрушающим грибам. М.: Наука, 1992. С. 140–172. Solov'yev V.A. Mycogenic Xylolysis, Its Ecological and Technological Significance. *Scientific Basis of Forest Resistance to Wood-Destroying Fungi*. Moscow, Nauka Publ., 1992, pp. 140–172.

13. Стороженко В.Г. Датировка разложения валежа ели // Экология. 1990. № 6. С. 66–69. Storozhenko V.G. Dating of Spruce Deadwood Decomposition. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 1990, no. 6, pp. 66–69.

14. Стороженко В.Г., Быков А.В., Бухарева О.А., Петров А.В. Устойчивость лесов. Теория и практика биогеоценотических исследований. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 171 с. Storozhenko V.G., Bykov A.V., Bukhareva O.A., Petrov A.V. *Sustainability of Forests. Theory and Practice of Biogeocenotic Research*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2018. 171 p.

15. Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора: таблицы для таксации леса. М.; Л.: Лесн. пром-сть, 1952. 854 с. Tret'yakov N.V., Gorskiy P.V., Samoylovich G.G. *Handbook of a Forest Cruiser: Tables for Forest Inventory*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1952. 854 p.

16. Ярошенко А.Ю., Потанов П.В., Турубанова С.А. Малонарушенные лесные территории Европейского Севера России. М.: Гринпис России, 2001. 72 с. Yaroshenko A.Yu., Potanov P.V., Turubanova S.A. *The Last Intact Forest Landscapes of Northern European Russia*. Moscow, Greenpeace Russia Publ., 2001. 75 p.

- 
17. *Classification of Plant Communities*. Ed. by R.H. Whittaker. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1978. 408 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-9183-5>
  18. Clements F.E. Nature and Structure of the Climax. *Journal of Ecology*, 1936, vol. 24, no. 1, pp. 252–284. DOI: <https://doi.org/10.2307/2256278>
  19. Clements F.E. *Dynamics of Vegetation*. New York, The H.W. Wilson Company, 1949. 296 p.
  20. Harmon M.E., Chen H. Course Woody Debris Dynamics in Two Old-Growth Ecosystems. *BioScience*, 1991, vol. 41, iss. 9, pp. 604–610. DOI: <https://doi.org/10.2307/1311697>
  21. Ivantsov S., Bjelkåsen T., Sørensen O.J. Structures in Old Growth Forest Stands in the Yula River Basin. *The Last Large Intact Forests in Northwest Russia*. Ed. by K. Spidsø, O.J. Sørensen. Copenhagen, Nordic Council of Ministers, 2009, pp. 67–75.
  22. Jia-Bing W., De-Xin G., Shi-Jie H., Mi Z., Chang-Jie J. Ecological Functions of Coarse Woody Debris in Forest Ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 2005, vol. 16, iss. 3, pp. 247–252. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02856826>
  23. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the Dead Wood Carbon Pool in Northwestern Russian Boreal Forests. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, vol. 82, iss. 1-2, pp. 227–238. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01182836>
  24. Sells G.H. The Climax Concept. *The Botanical Review*, 1960, vol. 26, iss. 4, pp. 534–545. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02940574>
  25. Shorohova E.V., Shorohov A.A. Coarse Woody Debris Dynamics and Stores in a Boreal Virgin Spruce Forest. *Ecological Bulletins*, 2001, no. 49, pp. 129–135. Available at: <http://www.jstor.org/stable/20113270> (accessed 20.08.20).
  26. Sørensen O.J., Bjelkåsen T., Ivantsov S.V. Examples of the Internal Stand Structures (A-Diversity) Old Growth Forest in the Yula River Basin – Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 98–107. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/294/lh11.pdf>

УДК 630\*232.411.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-50-58

## PRODUCTIVITY OF PINE PLANTATIONS DURING RECLAMATION OF SAND QUARRIES

*Natalia R. Sungurova, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>*

*Irina A. Popkova, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAE-1329-2022](https://orcid.org/0000-0002-8180-5673),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8180-5673>*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: n.sungurova@narfu.ru, i.olupkina@narfu.ru

Original article / Received on May 3, 2020 / Accepted on August 13, 2020

**Abstract.** Restoration of lands disturbed by anthropogenic impact is currently the most urgent issue in the light of the gradually decreasing area of commercially valuable plantations. Reclamation of quarries includes restoration of artificial landscape by carrying out various kinds of measures. We have surveyed the quarries located in the northern districts of the Arkhangelsk region. These quarries were used for sand mining in the construction of roads of federal and regional importance. No forestry activities were carried out in one of the quarries. It was adopted as a control site and abandoned to natural regrowth. Deciduous trees and shrubs (birch, willow) in some places grow there after a decade and a half. In two other surveyed quarries mechanical soil treatment was carried out and seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) were planted. This species is used for planting on sandy soils to form valuable productive stands. Studies have shown that pine young stands of the second age class have quality class II, with the average forest inventory values of a diameter of 14.6 cm, a height of 15.6 m and a stock of 168 m<sup>3</sup>/ha. The plants are healthy, physiologically developed with the average annual increment of 56 cm over the last decade. Forestry measures effectively carried out in the development of sand quarries, firstly, provide the necessary optimal conditions for growth and development of plants, and, secondly, biologically productive areas of the land surface are formed due to forest reclamation. These territories are an excellent reserve for increasing the areas covered by forest vegetation.

**For citation:** Sungurova N.R., Popkova I.A. Productivity of Pine Plantations during Reclamation of Sand Quarries. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 50–58. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-50-58

**Keywords:** sand quarry, forest plantations, pine, disturbed lands, land reclamation, reforestation.

## ПРОДУКТИВНОСТЬ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПЕСЧАНЫХ КАРЬЕРОВ

*Н.Р. Сунгурова, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-1847-2019](https://orcid.org/0000-0002-8464-4596),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-4596>*

*И.А. Попкова, аспирант; ResearcherID: [AAE-1329-2022](https://orcid.org/0000-0002-8180-5673),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8180-5673>*

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: n.sungurova@narfu.ru, i.olupkina@narfu.ru

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 03.05.20 / Принята к печати 13.08.20

---

**Аннотация.** Восстановление нарушенных антропогенным воздействием земель в связи с постепенным уменьшением площади хозяйственно-ценных насаждений является в настоящее время актуальным вопросом. Рекультивация карьеров включает в себя восстановление искусственного ландшафта путем проведения различного рода мероприятий. Цель исследования – определение эффективности проведенных лесохозяйственных мероприятий искусственного лесовосстановления в песчаных карьерах Архангельской области. Обследованы карьеры в северных районах региона, использовавшиеся для добычи песка при строительстве дорог федерального и регионального значения. В одном из карьеров, выбранном в качестве контроля, лесохозяйственные мероприятия не проводились, и он был оставлен под естественное зарастание. Спустя полтора десятилетия карьер частично зарос лиственными деревьями и кустарниками (береза, ива). В двух других обследованных карьерах осуществлена механическая обработка почвы и высажены сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Именно эту породу применяют для посадки на песчаных землях с целью формирования ценных продуктивных древостоев. Показано, что сосновые молодяки второго класса возраста имеют класс бонитета II, средние диаметр, высоту и запас – 14,6 см; 15,6 м и 168 м<sup>3</sup>/га соответственно. Растения здоровые, физиологически развитые, их средний годовой прирост за последнее десятилетие составил 56 см. Эффективно выполненные лесохозяйственные мероприятия при освоении песчаных карьеров, во-первых, обеспечивают необходимые оптимальные условия для роста и развития деревьев, а во-вторых, способствуют формированию биологически продуктивных участков почвы. Рекультивированные карьеры являются отличным источником преумножения площадей, покрытых лесной растительностью.

**Для цитирования:** Sungurova N.R., Popkova I.A. Productivity of Pine Plantations during Reclamation of Sand Quarries // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 50–58. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-50-58

**Ключевые слова:** песчаные карьеры, лесные культуры, сосна, нарушенные земли, рекультивация земель, лесовосстановление.

### Introduction

Reclamation of disturbed lands involves restoration of landscape, soil structure and fertility, hydrological regime of the area, along with reproduction of successions through a set of engineering (technical), agrotechnical, silvicultural and biological measures. These works are regulated by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1724-r dated September 26, 2013 “On Approval of the Basis of the State Policy in the Use, Preservation, Protection and Regeneration of Forests in the Russian Federation for the Period up to 2030” and by the Forest and Land Codes of the Russian Federation. The primary regulatory document for reclamation of disturbed lands in the forestry sector is “The Rules of Afforestation”, which were developed on the basis of the Article No. 63 of the Forest Code and approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 149 on June 8, 2007.

Forestry-based reclamation includes the creation of various types of forest plantations on disturbed lands. Forest reclamation should be carried out on anthropogenically disturbed areas of all categories, as well as on adjacent territories that have completely or partially lost their productivity. The complex of unfavorable

factors, the major of which are unfavorable water regime and poverty of soil in elements of mineral nutrition, is the hinder of the natural reclamation of these areas [8]. A number of authors [4, 6, 11, 13, 17, 19, 21, 22, 24] point that together with planting of woody vegetation in those areas where the ground cover grows poorly and on infertile soils, it is essential to create simulated sword of perennial grasses. For instance, Kazakov L.A., Vishnyakov G.V. and Chamin V.A. [9] recommend sowing sand ryegrass on the Kola Peninsula.

Likhanova I.A. and Kovaleva V.A. [12] emphasize that by selecting optimal measures for a particular reclamation object it is possible to accelerate the formation of forest plantation (soil and microbial composition, living ground cover and tree layer) due to managing the competitive relationship between the components of anthropogenic phytocenosis.

During the construction of forest roads, as well as roads of regional and federal importance in the Arkhangelsk region, sand mined in quarries is used. Such quarries are ubiquitous in the territory of the Northwestern Federal District.

The research purpose is to determine the effectiveness of the forestry measures carried out through artificial reforestation in sand quarries of the Arkhangelsk region.

#### *Research objects and methods*

In the course of the scientific inquiry, various sites of the land surface were sampled after sand mining. These quarries were developed in the construction of roads of regional and federal importance. They are located in the northern districts of the Arkhangelsk region.

Sand quarry No. 1 with an area of 6 ha is located in the north of the region in the Kholmogory forestry close to the technological route of the nearby timber industry enterprise. This site was used for sand harvesting with the purpose of construction of this forest road. Forest reclamation work was carried out in 1987. The surface was levelled by a bulldozer blade before tillage in the quarry. Forest cultivation technology includes: plowing of loosened microhills by an auger plow PSh-1 together with a tractor LKhT-100; manual planting of 2-year-old standard seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in microhills using Kolesov's sword according to the scheme 0.6×3 m (fig. 1, *a*). This cultivated species was not randomly chosen, since it is used for planting on sandy soils to form valuable and productive stands. The initial density of forest plantations is 5,550 pcs/ha. Single specimens of willow appeared in the quarry before the forestry measures.

Sand quarry No. 2 with an area of 1.5 ha was developed in 2003 for the construction of the Arkhangelsk-Karpogory regional road. Forest reclamation work was carried out two years after sand mining. The surface was graded by the bulldozer blade prior to tillage in the quarry. The technology of forest cultivation works was as follows: preparation of fire lines 1.2 m wide with a wedge-shaped pusher TK-1,2 together with a tractor LKhT-55M; manual planting of 2-year-old standard seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the middle of the line using Kolesov's sword according to scheme 0.5×3.5 (fig. 1, *b*). The seedlings were grown in the greenhouse of the Kholmogory forestry. The initial density of set out plants is 5,800 pcs/ha.

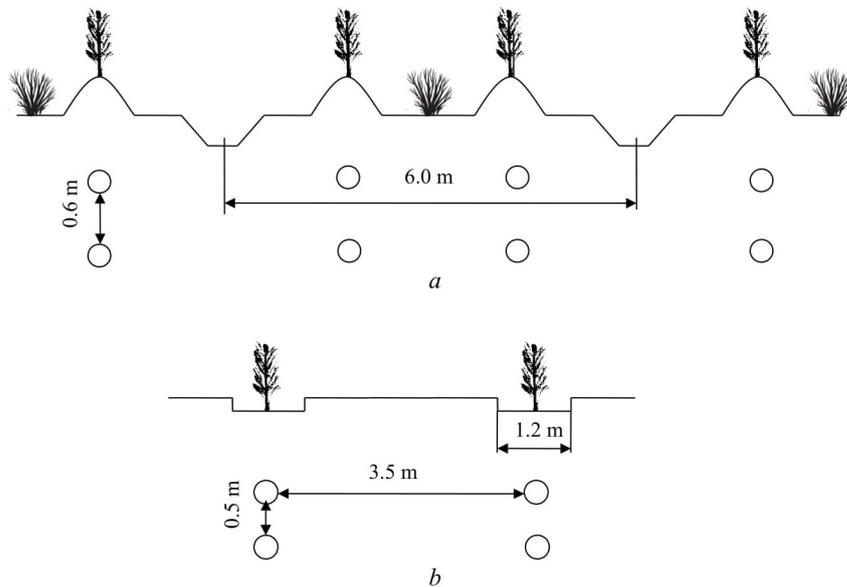


Fig. 1. Technological scheme of forest plantations: *a* – sand quarry No. 1; *b* – sand quarry No. 2

Sand quarry No. 3 with an area of 5 ha developed in 2003 in the vicinity of the Lukovetsky settlement was chosen as a control site. This area was left under natural regrowth and after sand mining no forest management activities were carried out here. There are 1,525 pcs/ha of seed birches and 1,348 pcs/ha of willow bushes after 17 years.

The survey of stands in the quarries was carried out according to generally accepted methods and techniques [10, 14, 15, 18, 20]. The height, diameter, and annual increment of pine trees were measured for the last 10 years; and the number of surviving plants was determined.

The ground cover in the forming plantation phytocenoses was studied on the test plots of 1×1 m size, which were laid out evenly over the area according to the method of Astrologova L.E. and Gortinskiy G.B. [3].

Undergrowth was counted by size, vital condition, and species composition on the test plots of 2×5 m size, based on the method of Melekhov I.S. [16]. Simultaneously, understory species were recorded and classified according to their species composition and vital condition. The number of recorded plants was converted per hectare.

### *Research results and discussion*

In order to restore economically valuable lands and minimize environmental damage, it is necessary to reclaim disturbed anthropogenic territories. There is an initial period (i.e. the time interval during which, in the territory devoid of any vegetation, the first representatives of flora appear) on technogenic lands – rock dumps, abandoned quarries, right-of-ways along roads under construction, gas and oil pipelines, friable sands and alluvial deposits [4, 8].

Regulatory requirements for forest reclamation are reduced to creation of biologically productive areas of land surface with the necessary conditions for plant

growth and development without fertile soil coating. The floristic composition of these areas is formed gradually, starting with the ground cover and ending with the stand.

The productivity of plants in the living ground cover depends on the nature of vegetation and, consequently, on the age of plantations. Meadow grasses with the greatest distribution in sand quarry No. 1 form a larger phytomass per area unit. In sand quarry No. 2, where the abundance of meadow species is much lower, the value of this parameter decreases. During growth of forest plantations, the dominant ecological groups of plants in the living ground cover change from meadow and meadow-grassland to typically forest species.

The living ground cover is very diverse in pine plantation phytocenoses of the second age class. The upper layer consists of rosebay willowherb (*Chamerion angustifolium* (L.) Scop.), wild angelica (*Angelica sylvestris* L.), woodland geranium (*Geranium sylvaticum* L.), tufted vetch (*Vicia cracca* L.) and Paris herb (*Paris* L.). Next are berry prostrate shrubs: bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.), stone bramble (*Rubus saxatilis* L.), and cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Except that, Arctic starflower (*Trientalis europaea* L.), tufted sedge (*Carex gracilis* Curt.) and wood sorrel (*Oxalis acetosella* L.) can also be found.

In the living ground cover of pine plantation phytocenoses, those representatives of flora grow first, root system of which at the beginning of the vegetation period (i.e., even before the establishment of constant summer temperatures) develops in the lower soil horizons with lower temperatures and higher humidity. Plants with large annual height increment, intensive seed reproduction, actively creating vast biogroups, shading the soil surface and protecting root systems from overheating dominate here. An outstanding example is wild strawberry (*Fragaria vesca* L.), as well as a long-rooted species, such as rosebay willowherb (*Chamerion angustifolium* (L.) Scop.), the buds of which lie at a considerable depth, where temperatures are lower [1, 2].

Soil overgrowth depends on the soil horizons that form the tillage layer. In soil preparation, when microhills are formed only from the humus-accumulative horizon, which is clogged with seeds of herbaceous vegetation without involving the underlying mineral soil horizons in tillage, the intensity of their overgrowth increases [2].

Sand quarry No. 2, in connection with the depletion of elements of mineral nutrition in soil horizons, is characterized by relatively low species representation of the living ground cover. Overgrowth of the cultivated soil with herbaceous vegetation is weak here. The dominant species in the quarry are the following: wood horsetail (*Equisetum sylvaticum* L.), rosebay willowherb (*Chamerion angustifolium* (L.) Scop.), and coltsfoot (*Tussilago farfara* L.). There are also chamomile (*Matricaria chamomilla* L.), red clover (*Trifolium pratense* L.), and tufted sedge (*Carex gracilis* Curt.).

When taking into account natural regeneration of woody species, we found that in the intergrowth space of sand quarry No. 1 unaffected by tillage 5,880 pcs/ha of seed birch (*Betula pendula* Ehrh.) grow and on the whole area there are 4,100 pcs/ha of viable spruce (*Picea abies* Link.) undergrowth: small – 2,114 pcs/ha, medium – 1,179 pcs/ha, and large – 807 pcs/ha. In the lower storey there are isolated specimens of juniper (*Juniperus communis* L.) and mezereum (*Daphne mezereum* L.), there are 1,520 pcs/ha of bay willow (*Salix pentandra* L.), which appeared here mainly before the forestry works.

Sand quarry No. 2 is surrounded on three sides by the forest stand of natural origin, so that 15,200 pcs/ha of birch (*Betula pendula* Ehrh.) are located evenly over

the studied area. Under the canopy of pine and deciduous young stands 2,800 pcs/ha of viable young spruce (*Picea abies* Link.) grow, mostly small and medium. When studying the lower storey, 5,800 pcs/ha of bay willow (*Salix pentandra* L.) appeared here mainly before the beginning of forest reclamation were recorded.

During reconnaissance survey of quarries the most typical sites of formed plantation phytocenoses were found for each object. On the sites the survey of artificially created pine young growth was carried out, forest inventory characteristics of which are given in table.

#### Growth course of pine plantation phytocenoses in the sand quarries

Plantation age, yrs	Average			Survival rate, %	Density	Stock, m <sup>3</sup> /ha	Quality class
	Height, m	Diameter, cm	Increment, cm				
<i>Sand quarry No. 1</i>							
27	11.8±0.81	11.5±0.30	61±0.44	57.4±0.89	0.9	152	II
34	15.6±0.99	14.6±0.57	62±0.49	57.0±1.02	0.9	168	II
<i>Sand quarry No. 2</i>							
9	3.0±0.02	2.8±0.03	42±0.22	77.7±0.69	0.7	18	II
16	6.1±0.37	5.9±0.05	46±0.26	75.0±0.70	0.8	44	II

The research results show that highly productive stands with positive dynamics of productivity increase are formed on the surveyed sites of land surface. Thus, the stands of the second age class (sand quarry No. 1) reach a height of 15.6 m with an average diameter of 14.6 cm. The current annual increment of these stands is on average 62 cm. The value of increment is influenced by the uniform distribution of trees over the area with the survival rate of 57 % and density of 0.9 m<sup>2</sup>/ha. The composition of the plantings is 9P1B (9 pines, 1 birch). Forest plantations accumulate a stock of 168 m<sup>3</sup>/ha and have quality class II, which exceeds the average quality class in the Arkhangelsk region. Average value of quality class for coniferous plantations in the region is IV.7 (4.7).

At the same time, there is a series of works in this field in different parts of our country, where researchers represent the data, which are somewhat different. Thus, Nureeva T.V. et al. [17], surveying pine plantations created with different planting spacing in quarries, point that the height of 12-year-old plantations varies from 4.2 to 4.6 m depending on the density of creation, and the diameter varies from 3.8 to 5.9 cm. Zalesov S.V. et al. [23] provide the data obtained in the Sverdlovsk region. Pine forest plantations at the age of 9 have quality class II with a height of 2.6 m, a diameter of 3.7 cm, forming a stock of 5.63 m<sup>3</sup>/ha. Gavrilova O.I. [7] carried out a similar study of pine plantations in gravel and sand quarries of the Republic of Karelia and came to the conclusion that in some quarries the height of 9-year-old trees is 2.25 m, and in other areas 12-year-old trees reach 1.0–1.2 m in height.

In sand quarry No. 2 pine trees of the first age class grow according to quality class II accumulating a stem stock of 44 m<sup>3</sup>/ha. The average height of pine trees is 6.1 m with a diameter of 5.9 cm. Herewith, at this site there are 75 % of preserved physiologically healthy proportionally developed trees. The composition of the plantings is 8P2B (8 pines, 2 birches).

According to the forest inventory parameters of plantations, we can judge that the technology of creation of artificial young growth on the recultivated lands is fulfilled according to the available requirements, which is indicated by the average

height increment of plantations (fig. 2). The values of increment mainly vary depending on the weather conditions of a particular vegetation period. In warm, moderately humid summers, the increment of pine trees is the maximal: in sand quarry No. 1 – 62 cm; in sand quarry No. 2 – 48 cm. The average annual increment for 10 years in sand quarry No. 2 is  $43.8 \pm 0.07$  cm, in sand quarry No. 1 –  $55.8 \pm 0.14$  cm. Deviation from the average value varies within 3–4 cm and 5–7 cm, respectively.

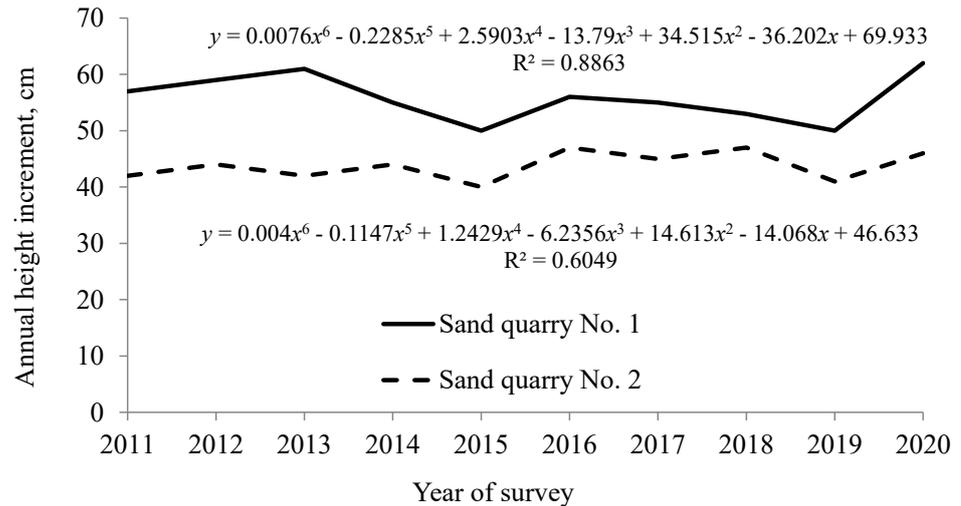


Fig. 2. Dynamics of annual height increment of pine plants in the surveyed areas (in the equation:  $y$  – increment, cm;  $x$  – age of pine plantations, yrs)

The growth curve is best approximated by polynomial function of the sixth degree. The coefficient of determination ( $R^2$ ) in plantations of the second age class is higher than in young growth of the first age class and is 0.89 and 0.60, respectively.

Comparing the main forest inventory parameters of the surveyed young growth with the tables of growth rate of young pine stands of artificial origin, it is possible to conclude that forest plantations created in the reclaimed quarries are characterized by sufficiently high productivity. Thus, at the age of 34 in the Northern taiga forest inventory area the stock of forest plantations reaches  $168 \text{ m}^3/\text{ha}$  at the average height of 15.6 m. Quality class of pine plantations is II. Whereas, according to the growth rate tables given in the Forest Inventory Handbook for the North-East of the European Part of the Russian Federation [5], 30-year-old young pine forests of artificial origin in the Southern taiga forest inventory area have an average height of 10.9 m, average diameter of 8.2 cm and stock of  $176 \text{ m}^3/\text{ha}$ ; and at the age of 10, the average height is 2.2 m, diameter is 2.6 cm and stock is  $8.8 \text{ m}^3/\text{ha}$ .

In addition to Scots pine, fast-growing deciduous species such as silver birch (*Betula pendula* Ehrh.) can also be recommended as a cultivated species on sandy areas based on the research and analysis of literature sources. Relying on the studies carried out in the Dendrological Garden named after V.N. Nilov of the Northern (Arctic) Federal University, American maple (*Acer negundo* L.) can also be recommended in these conditions.

### Conclusion

The research results have shown that when forest reclamation work is ignored in the quarries after sand extraction in 17 years at such a site (control sample area No. 3) there are 1,525 pcs/ha of birch of seed origin, which is extremely insufficient for the formation of highly productive plantations.

At the same time effectively implemented forestry measures in the development of sand quarries No. 1 and No. 2, first of all, will provide the necessary optimal conditions for growth and development of plants, and secondly, will serve to form biologically productive areas of land surface. Pine young growth of the second age class is growing according to quality class II, have a stock of 168 m<sup>3</sup>/ha with the average forest inventory values of diameter 14.6 cm and height 15.6 m. The plants are healthy, physiologically developed with an average annual increment of 56 cm over the last decade. These sites are an excellent reserve for increasing the area covered with forest vegetation.

### REFERENCES

1. Astrologova L.E. *Types of Clearcuts and Reforestation of Tree Species*. Arkhangelsk, AGTU Publ., 2002. 96 p.
2. Astrologova L.E., Babich N.A. The Influence of Forestry Measures on the Composition of the Living Ground Cover in Pine Plantations. *Ecological Problems of the North. Interuniversity Collection of Academic Papers*. Arkhangelsk, SOLTI Publ., 1998, pp. 5–8.
3. Astrologova L.E., Gortinskiy G.B. *Methodology Guidelines for Field Practice in Botany*. Arkhangelsk, RIO ALTI Publ., 1980. 32 p.
4. Evans D.M., Zipper C.E., Burger J.A., Strahm B.D., Villamagna A.M. Reforestation Practice for Enhancement of Ecosystem Services on a Compacted Surface Mine: Path toward Ecosystem Recovery. *Ecological Engineering*, 2013, vol. 51, pp. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.065>
5. *Forest Inventory Handbook for the North-East of the European Part of the Russian Federation: (Standards, Specifications and Guidelines for the Nenets Autonomous Okrug, the Arkhangelsk and Vologda Regions and the Komi Republic)*. Content by G.S. Voynov, N.P. Chuprov, S.V. Yaroslavtsev, S.V. Torkhov, A.P. Shusharin. Arkhangelsk, NRIF Publ., 2012. 672 p.
6. Franklin J.A., Zipper C.E., Burger J.A., Skousen J.G., Jacobs D.F. Influence of Herbaceous Ground Cover on Forest Establishment on Eastern US Coal Surface Mines. *New Forests*, 2012, vol. 43, iss. 5–6, pp. 905–924. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9342-8>
7. Gavrilova O.I. Restoration of Vegetation Cover in Sand and Gravel Quarries by Artificial Reforestation Methods. *Resources and Technology*, 2010, vol. 8, pp. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2010.1739>
8. Kapel'kina L.P. Analysis of the Experience of Forest Reclamation of Disturbed Lands. *Reforestation in the Volga Region: State and Ways of Improvement*. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2013, pp. 62–68.
9. Kazakov L.A., Vishnyakov G.V., Chamin V.A. Forest Melioration of Kuzomen Sands. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Herald of the Kola Science Centre of RAS], 2011, no. 2(5), pp. 58–63.
10. Kobranov N.P. *Survey and Study of Forest Plantations*. Leningrad, RIO LTA Publ., 1973. 77 p.

11. Likhanova I.A., Archegova I.B., Khabibullina F.M. *Restoration of Forest Ecosystems in Technologically Disturbed Territories of the North*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2006. 104 p.
12. Likhanova I.A., Kovaleva V.A. Controlled Restoration of Forest Ecosystems on Sandy Technogenic Substrates in the Far Northern Taiga of the Russian European Northeast. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2018, no. 43, pp. 174–195. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/43/9>
13. Macdonald S.E., Landhäusser S.M., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. Forest Restoration Following Surface Mining Disturbance: Challenges and Solutions. *New Forests*, 2015, vol. 46, iss. 5, pp. 703–732. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>
14. Maslakov E.L., Moyko M.F., Markova I.A., Kovalev M.S. *The Study of the Growth of Forest Plantations*. Leningrad, LenNILKh Publ., 1978. 71 p.
15. Melekhov I.S. Issues of Diagnosis and Classification of Concentrated Clearcuts. *Concentrated Cuttings in the Forests of the North*. Moscow, AN SSSR Publ., 1954, pp. 48–60.
16. Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1989. 302 p.
17. Nureeva T.V., Kuklina N.A., Chefranova M.N., Mukhortov D.I. Patterns of Growth and Formation of Scots Pine Species for the Purpose of Quarry Recultivation. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2016, no. 1(29), pp. 57–68.
18. Ogiyevskiy V.V., Khirov A.A. *Survey and Study of Forest Plantations*. Leningrad, LTA Publ., 1967. 50 p.
19. Ortiz O., Ojeda G., Espelta J.M., Alcañiz J.M. Improving Substrate Fertility to Enhance Growth and Reproductive Ability of a *Pinus halepensis* Mill. Afforestation in a Restored Limestone Quarry. *New Forests*, 2012, vol. 43, iss. 3, pp. 365–381. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9286-4>
20. Rodin A.R., Merzlenko M.D. *Instructional Guidelines for the Study of Old-Growth Forest Plantations*. Moscow, VASKhNIL Publ., 1983. 37 p.
21. Skousen J., Ziemkiewicz P., Venable C. Tree Recruitment and Growth on 20-Year-Old, Unreclaimed Surface Mined Lands in West Virginia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2006, vol. 20, pp. 142–154. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930600589833>
22. Torbert J.L., Burger J.A., Schoenholtz S.H., Kreh R.E. Growth of Three Pine Species after Eleven Years on Reclaimed Mineseils in Virginia. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2000, vol. 17, iss. 3, pp. 95–99. DOI: <https://doi.org/10.1093/njaf/17.3.95>
23. Zalesov S.V., Zalesova E.S., Zverev A.A., Opletayev A.S., Terin A.A. Artificial Reforestation on Reclaimed Lands in the Area of Pine-Birch Forest-Steppe Forests. *Problems of Forest Reproduction in the European Taiga*. Kostroma, KSU Publ., 2012, pp. 63–66.
24. Zipper C.E., Burger J.A., Skousen J.G., Angel P.N., Barton C.D., Davis V., Franklin J.A. Restoring Forests and Associated Ecosystem Services on Appalachian Coal Surface Mines. *Environmental Management*, 2011, vol. 47, iss. 5, pp. 751–765. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9670-z>

УДК 634.54:630.228

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-59-72

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРОН ЛЕЩИНЫ В ГОРНЫХ ЛЕСАХ

*С.Г. Биганова<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [E-3358-2018](https://orcid.org/0000-0002-0581-3612),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612>*

*Ю.И. Сухоруких<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [ABF-3548-2020](https://orcid.org/0000-0001-5073-6102),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>*

*К.Н. Кулик<sup>2</sup>, д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН; ResearcherID: [U-4690-2017](https://orcid.org/0000-0001-7124-8116),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7124-8116>*

*А.К. Кулик<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [W-4034-2018](https://orcid.org/0000-0001-5927-7336),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5927-7336>*

<sup>1</sup>Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, д. 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, Россия, 385000; e-mail: svetlanabiganowa@yandex.ru, drsuchor@rambler.ru

<sup>2</sup>Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; e-mail: kulikkn@yandex.ru, kulikak79@yandex.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 28.03.20 / Принята к печати 06.08.20

---

**Аннотация.** Лещина обыкновенная ценна питательными и лечебными свойствами, способностью осуществлять почвоохранные функции. При этом морфологические признаки данного растения изучены недостаточно. Цель работы – выявление особенностей значимых морфологических параметров кроны плодоносящих растений лещины, оценка биологического разнообразия данных параметров на различных высотах, под пологом леса и на полянах для последующего установления лесохозяйственных и экологических функций этого растения, отбора декоративных и других хозяйственно-ценных форм. Объектом исследования являлись плодоносящие растения лещины, произрастающие в горных лесах Северо-Западного Кавказа на высоте 450...600 и 1300...1500 м над ур. м. под пологом леса и на полянах. Изучали диаметры центрального и трех наибольших стволов, кроны и основания куста, его высоту, количество побегов до 4 лет и старше, общее количество побегов в кусте, густоту и форму кроны. Обследовано 200 рамет, вступивших в стадию плодоношения. Индекс разнообразия рассчитывали по авторской методике (Сухоруких–Биганова). На высоте 1300...1500 м над ур. м. в условиях лучшего увлажнения по сравнению с участками, расположенными на высоте 450...600 м над ур. м., лещина имеет статистически достоверное лучшее развитие средних диаметров у центрального и трех основных стволов, кроны, большее общее количество побегов до 4 лет и старше. На полянах в условиях хорошего освещения по сравнению с условиями, складывающимися под пологом леса, лещины имеют превосходящие диаметры кроны и основания куста, большее число побегов до 4 лет и старше, общее число побегов в кусте. Здесь растения чаще образуют кусты с раскидистой и густой кроной. На верхних участках установлены значимый больший индекс разнообразия для среднего диаметра трех наибольших стволов куста лещины и наибольшее количество побегов старше 4 лет. На полянах по сравнению с участками под пологом леса наблюдается значимо превосходящее отличие индекса морфологического разнообразия по среднему диаметру основания куста, количеству побегов до 4 лет и старше,

общему количеству побегов, густоте крон. По форме крон индекс разнообразия выше под пологом леса, чем на поляне. Обобщенные индексы разнообразия количественных, качественных и общих морфологических признаков кустов лещины не имели существенных отличий на различных высотах, в условиях под пологом леса и на полянах.

**Для цитирования:** Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Кулик К.Н., Кулик А.К. Морфологические показатели крон лещины в горных лесах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 59–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-59-72

**Ключевые слова:** лещина обыкновенная, горные леса, лесной полог, поляны, диаметр ствола, диаметр кроны, высота кроны, диаметр основания куста, численность побегов, корреляция, индекс разнообразия.

## MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HAZEL CROWNS IN MOUNTAIN FORESTS

**Svetlana G. Biganova**<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-3358-2018](https://orcid.org/0000-0002-0581-3612),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612>

**Yuri I. Sukhorukikh**<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [ABF-3548-2020](https://orcid.org/0000-0001-5073-6102),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>

**Konstantin N. Kulik**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof., Academician of RAS;  
ResearcherID: [U-4690-2017](https://orcid.org/0000-0001-7124-8116), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7124-8116>

**Aleksey K. Kulik**<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [W-4034-2018](https://orcid.org/0000-0001-5927-7336),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5927-7336>

<sup>1</sup>Maykop State Technological University, ul. Pervomayskaya, 191, Maykop, Republic of Adygeya, 385000, Russian Federation; e-mail: svetlanabiganowa@yandex.ru, drsuchor@rambler.ru

<sup>2</sup>Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Forests of the Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; e-mail: kulikkn@yandex.ru, kulikak79@yandex.ru

---

Original article / Received on March 28, 2020 / Accepted on August 6, 2020

---

**Abstract.** Common hazel is valuable for its nutritional and medicinal properties and its ability to provide soil conservation functions. However, the morphological characteristics of this plant have not been studied sufficiently. The research purpose is to identify features of significant morphological characteristics of crowns of nut-bearing hazel plants, to assess the biological diversity of these characteristics at different heights, under the forest canopy and on the glades for further detection of forestry and ecological functions of this plant, and to select ornamental and other economically valuable forms. The nut-bearing hazel plants growing in the mountain forests of the North-Western Caucasus at the altitude of 450–600 and 1,300–1,500 m above the sea level under the forest canopy and on the glades were the objects of the research. We studied the diameters of the central and three largest trunks, the crown and the base of the bush, its height, the number of shoots up to 4 years old and older, the total number of shoots in the bush, the density and shape of the crown. We examined 200 ramets that had entered the fruiting stage. The diversity index was calculated according to the authors' method (Sukhorukikh-Biganova). At the altitudes of 1,300–1,500 m above the sea level, under better humidification compared to the sites located at the altitude of 450–600 m, hazel has statistically reliable better development of average diameters of the central and three main trunks and crown, higher total number of shoots up to 4 years old and older. Hazel trees have superior crown and bush base diameters, greater number of shoots up to 4 years old and older,

the total number of shoots in the bush on the glades in conditions of good light compared to those under the forest canopy. Here the plants are more likely to form bushes with a spreading and thick crown. The upper sites showed a significantly higher diversity index for the average diameter of the three largest trunks of the hazel bush and the highest number of shoots older than 4 years. There is a significantly superior difference in the morphological diversity index for the average diameter of the bush base, the number of shoots up to 4 years old and older, the total number of shoots, and crown density on the glades compared to the sites under the forest canopy. In terms of crown shape, the diversity index is higher under the forest canopy than on the glade. The generalized indices of diversity of quantitative, qualitative and general morphological characteristics of hazel bushes did not differ significantly at different heights, under forest canopy and on the glades.

**For citation:** Biganova S.G., Sukhorukikh Yu.I., Kulik K.N., Kulik A.K. Morphological Characteristics of Hazel Crowns in Mountain Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 59–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-59-72

**Keywords:** common hazel, mountain forests, forest canopy, glades, trunk diameter, crown diameter, crown height, bush base diameter, number of shoots, correlation, diversity index.

### Введение

Лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) является особо ценным для человека растением [20, 26, 29, 32]. Она дает вкусные питательные плоды, обладающие лечебными свойствами [15, 20–22, 27]. Ее листья, кора, скорлупа содержат значительное количество биологически активных веществ [7, 20, 23, 25]. Вид выполняет защитные функции [11, 17, 20], выступает в качестве ценной почвоулучшающей и подлесочной породы в лесных биоценозах [7, 30]. По совокупности полезных свойств, отмечает М.Е. Ткаченко, «лещина – один из наиболее ценных кустарников в лесоводстве» [16, с. 285]. На высокую доходность для лесного хозяйства средней полосы России от этого растения указывает Ф.К. Арнольд [1]. Лещина обыкновенная распространена в различных регионах мира на разных высотах, но особый интерес представляет ее произрастание и культивирование в горных районах [24, 27, 28].

В зависимости от условий лещина (культурные сорта именуется фундуком) имеет различные параметры и особенности развития кроны [7, 12, 20, 24]. К числу основных относятся высота куста, диаметры кроны, основного и нескольких крупных стволов, основания куста, численность побегов различного возраста, густота и форма кроны [3, 5, 8, 9]. Данные параметры имеют региональные особенности [3, 11, 14, 17, 30, 32].

В литературе отмечается значительное отличие морфологических параметров крон в зависимости от произрастания на вырубках и под пологом леса [7, 12]. Подобные отличия выявлены и у сортов на разных высотах в горных условиях [24]. При этом основное число работ посвящено изучению растений, вступивших в стадию плодоношения [11, 14, 20, 22, 23, 28, 32].

Лещина широко распространена в горных лесах Северо-Западного Кавказа. Здесь она поднимается на высоту до 1500 м над ур. м. Отмечено совместное произрастание лещины с дубом, буком и пихтой. Основные региональные исследования сосредоточены на изучении качества плодов вида [4, 14, 19]. В то же время морфологические показатели крон, являющиеся особо важными в лесоводственных и общебиологических исследованиях и зависящие от высоты

произрастания над уровнем моря, от условий под пологом леса и на полянах, только отмечены в литературе, но не изучены [3, 14].

Значительный интерес для биологических исследований представляет изучение морфологического разнообразия вида, которое выражается количественными показателями [2, 6, 31]. В целях их оценки используется ряд критериев, и, как отмечается в литературе, выбирает эти критерии сам исследователь [2]. Одним из таких критериев является индекс разнообразия, в отличие от других критериев его возможно применять для комплексной оценки количественных и качественных показателей одновременно [4, 10].

В отношении лещины, произрастающей в горных условиях, подобных исследований выполнено недостаточно, а они актуальны для лесной, общебиологической науки и требуют внимания ученых.

Цель работы – изучение особенностей значимых морфологических параметров крон плодоносящих растений лещины, оценка их биологического разнообразия на различных высотах, под пологом леса и на полянах в горных районах Северо-Западного Кавказа для последующего выявления лесохозяйственных и экологических функций этого растения, отбора декоративных и других хозяйственно-ценных форм.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования являлись растения лещины, вступившие в стадию плодоношения (возрастом 7–8 лет и старше), произрастающие в подлеске дубово-буковых лесов на высоте 450...600 м над ур. м. и буково-пихтовых – на высоте 1300...1500 м над ур. м., а также на находящихся рядом полянах. Под пологом особи располагались единично с плотностью 15–25 шт./га, на полянах – по 5–10 шт./га, единично или группами. В каждом условиях изучено по 50 экземпляров, всего 200 растений. Для расчетов в однотипные выборки объединяли по 100 кустов лещины. Работы выполнены в 2017–2020 гг.

Диаметры стволов на высоте 0,5 м измеряли мерной вилкой, высоту куста – высотомером; диаметры кроны и основания куста – мерной лентой, численность побегов – методом сплошного пересчета. Для сравнимости результатов у многолетних растений использованы материалы полевых исследований 2019 г. Индекс разнообразия оценивали по значению относительной энтропии согласно методике [4, 10]:

$$IR = E = \frac{H}{H_{\max}},$$

где  $IR$  – индекс разнообразия;  $E$  – относительная энтропия распределения;  $H$  – вычисленная энтропия распределения;  $H_{\max}$  – максимальная энтропия для данного распределения.

Относительную энтропию для количественных показателей определяли при 10 классах разбиения массива данных; для качественных (форма и густота кроны) – при 3, устанавливаемых по методике госсортоиспытания [5, 8]. Морфологическое разнообразие отдельно для количественных и качественных показателей оценивали согласно методике [10] по уравнению

$$IR = \frac{\sum E_j}{n},$$

где  $IR$  – индекс разнообразия количественных (качественных) показателей;  $E_j$  – относительная энтропия показателя;  $n$  – общее число показателей.

В связи с разным разбиением количественных и качественных показателей общее разнообразие крон определяли путем их объединения в 86 классов. Размер классов соответствовал предшествующим значениям, принятым при первичной оценке конкретного показателя. Согласно методике Сухоруких–Бигановой в качестве существенного принималось различие между индексами разнообразия в 10 % и более [10].

Силу связи показателей устанавливали на основе известной классификации [18]: до  $|\pm 0,3|$  – связь практически отсутствует;  $|\pm 0,3| \dots |\pm 0,5|$  – связь слабая;  $|\pm 0,5| \dots |\pm 0,7|$  – связь умеренная;  $|\pm 0,7| \dots |\pm 1,0|$  – связь сильная.

Обработку данных проводили с использованием программы Stadia 8.0/prof. для Windows.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

*Диаметр наибольшего ствола в кусте.* В лучших местах произрастания растения развивают больший диаметр [7, 14]. В условиях, складывающихся на высоте 1300...1500 м над ур. м., этот показатель был достоверно выше на 1,72 см по сравнению с показателем на высоте 450...600 м над ур. м. ( $t_{\text{факт}} = 3,52$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Такое различие связано с лучшими условиями увлажнения находящихся выше горных территорий, где выпадает 1200–2000 мм осадков, по сравнению с условиями нижележащих участков, где сумма годовых осадков составляет 800–1000 мм [13, 20, 24].

Различие диаметра у растений, произрастающих в лесу и на поляне, на 0,22 см оказалось несущественным ( $t_{\text{факт}} = 0,44$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Диаметр основного ствола имеет тесную связь со средним диаметром трех наибольших стволов, умеренную по силе – с высотой и диаметром кроны, с остальными показателями – слабую или практически отсутствующую.

Отличие индексов разнообразия незначимо и составило по высотам 9,59 %, по условиям «лес – поляна» – 1,76 %.

*Средний диаметр трех наибольших стволов в кусте.* На 3–4-й год у лещины обычно появляется поросль, образующая куст [7, 12]. С течением времени снижается интенсивность роста основного ствола в высоту и начинается его постепенное отмирание сверху вниз [12]. При этом другие побеги продолжают интенсивно расти и имеют лучшее развитие по диаметру, поэтому оценить общую продуктивность стволиков целесообразно по нескольким стволам: желательный минимум составляет три, так как обычно это количество появляется в первые годы. У плодоносящих растений на высоте 1300...1500 м над ур. м. средний диаметр превышал на 1,73 см аналогичные показатели кустов на высотах 450...600 м над ур. м. ( $t_{\text{факт}} = 4,08$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ), что связано с неодинаковым увлажнением. Различие показателей в лесу и на поляне составило 0,12 см и было несущественным ( $t_{\text{факт}} = 0,27$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ).

Отмечена сильная корреляционная связь среднего диаметра трех наибольших стволов со средними диаметрами основного ствола, кроны и высотой куста. С остальными показателями связь от умеренной до слабой, с численностью побегов до 4 лет она практически отсутствует. Разнообразие признака значимо различается по высотам – 10,67 %, по условиям «лес – поляна» не превышает критического и равно 5,96 %.

*Высота куста.* В естественной популяции лещины обыкновенной средняя высота плодоносящих кустов в различных местах имела близкие значения, а превышение в 0,10 м на высоте 450...600 м было недостоверным ( $t_{\text{факт}} = 0,35$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Высота особей, произрастающих под пологом леса, оказалась больше высоты растений на поляне на 0,36 м, но отличие статистически недостоверно при уровне значимости 0,05 ( $t_{\text{факт}} = 1,30$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Это можно объяснить тем, что при достижении максимума прироста центральные стволы приобретают наклонную форму и у лещины наблюдается «уплощение» кроны, а прирост диаметров стволов продолжается до гибели дерева [7, 12]. Подобное наблюдалось нами повсеместно во время экспедиционных работ.

Высота имеет сильную корреляционную связь со средним диаметром трех наибольших стволов, умеренную – с диаметрами наиболее крупного ствола и кроны, от умеренной до практически отсутствующей – с остальными показателями. Морфологическое разнообразие высоты куста значимого различия по высотам и условиям «лес – поляна» не имело и составило соответственно 6,86 и 1,28 %.

*Средний диаметр кроны куста.* Плодоносящие растения на высоте 1300...1500 м над ур. м. имели достоверно большие на 0,74 м средние диаметры кроны ( $t_{\text{факт}} = 2,60$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Это указывает на лучшие условия произрастания для лещины обыкновенной в верхней части рельефа. В лесу диаметр кроны был меньше на 0,67 м по сравнению с диаметром кроны растений, произрастающих на поляне ( $t_{\text{факт}} = 2,31$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Данная особенность обусловлена более оптимальным световым режимом и отсутствием конкуренции со стороны остальных древесных и кустарниковых растений на открытых площадях, что характерно и для других видов [1, 16].

Средний диаметр кроны сильно коррелирует со средним диаметром трех наибольших стволов, умеренно – с диаметром наибольшего ствола, основания куста, его высотой и численностью побегов старше 4 лет, слабо – с общей численностью побегов в кусте, практически незначимо – с численностью побегов возрастом до 4 лет.

Различие индексов разнообразия было незначимым и составило для высот 6,03 %, для условий «лес – поляна» – 3,45 %.

*Средний диаметр основания куста.* Кусты лещины, произрастающие на разных высотах, имели близкие значения данного признака, отличие в 0,07 м несущественно ( $t_{\text{факт}} = 1,24$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). На полянах, где наблюдаются лучшие для развития поросли световой и температурный режимы, диаметр основания оказался достоверно выше на 0,13 м ( $t_{\text{факт}} = 2,30$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Средний диаметр основания куста имел умеренную по силе связь с общим количеством побегов в кусте, численностью побегов старше 4 лет и средним диаметром кроны. С остальными показателями наблюдалась слабая связь. Значимое разнообразие среднего диаметра основания куста установлено для условий «лес – поляна»: на открытых площадях индекс разнообразия выше на 19,48 %; на разных высотах он значимо не отличался и составил 4,23 %.

*Количество побегов возрастом более 4 лет.* Плодоношение у лещины обычно наблюдается на побегах возрастом 4 года и старше. Их среднее количество на высоте 1300...1500 м над ур. м. было больше на 2,71 шт. по сравнению с количеством на низких высотах ( $t_{\text{факт}} = 3,91$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). Очевидно,

это связано с лучшим увлажнением высотных территорий при относительно мягком климате. На полянах, где складываются более благоприятные условия освещения и температуры, кусты лещины в среднем дали потенциально плодоносных побегов больше на 1,21 шт. ( $t_{\text{факт}} = 1,69$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ), чем лещины под пологом леса.

Численность побегов возрастом более 4 лет имеет сильную статистическую связь с общим количеством побегов (56,25 %), умеренную – с диаметром горизонтальной проекции кроны, средним диаметром основания куста и средним диаметром трех наибольших стволов, слабую – с диаметром наиболее крупного ствола и высотой куста, практически отсутствующую – с численностью побегов возрастом до 4 лет.

Морфологическое разнообразие данного признака на 21,18 % существенно больше в высокогорных местностях, чем в лежащих ниже. На полянах превышение составило 10,13 % по сравнению с морфологическим разнообразием признака в лесу.

*Количество побегов возрастом до 4 лет.* Образующаяся молодая поросль возрастом до 4 лет служит резервом для замещения плодоносных побегов [7, 12, 20]. На высоте 1300...1500 м над ур. м. средняя численность побегов моложе 4 лет была выше на 1,35 шт./куст, чем на территориях, расположенных ниже, но не имела статистического различия при уровне значимости 0,05 ( $t_{\text{факт}} = 0,47$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). На полянах, где складываются лучшие условия освещения по сравнению с условиями под пологом леса, количество таких побегов было достоверно большим на 2,58 шт. ( $t_{\text{факт}} = 2,73$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ).

Данный показатель практически не имеет статистической связи со всеми изучаемыми признаками, исключение составляет площадь основания куста, индекс детерминации которой – 0,20.

Индекс разнообразия у лещин на полянах отличается от индекса разнообразия у лещин лесных участков на значимую величину – 12,36 %. В верхней части территории по сравнению с нижней превышение составляет 4,76 %, что несущественно.

*Общее количество побегов в кусте.* Для территорий, занимающих разное положение по высоте над уровнем моря, среднее общее количество побегов в кусте повторяет тенденцию наличия побегов возрастом более 4 лет. На участках верхней зоны по сравнению с нижней численность побегов выше на 3,06 шт./куст, разность статистически достоверна ( $t_{\text{факт}} = 2,74$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ). На поляне суммарная численность побегов (возрастом до 4 лет и старше) больше на 3,79 шт./куст ( $t_{\text{факт}} = 2,95$ ;  $t_{\text{ст}} = 1,67$ ), чем в лесу. Для равнинных условий на вырубках это отмечают и другие авторы [8].

Показатель имеет сильную связь с численностью побегов до 4 лет и старше, умеренную – с диаметром основания кустов, слабую – с диаметром кроны и средним диаметром одного из трех наибольших стволов, практически отсутствующую – с диаметром наибольшего ствола и высотой куста.

Разнообразие кустов по численности побегов между высотами произрастания составляет 9,48 %, что несущественно. На полянах оно значимо выше (11,90 %) по сравнению с условиями под пологом леса.

Полученные данные сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Средние значения морфологических показателей крон лещины, произрастающей на разных высотах над уровнем моря  
и в различных лесорастительных условиях**

Показатель	450...600 м над ур. м		1300...1500 м над ур. м		Лес		Поляна	
	$X_{cp} \pm m$	<i>IR</i>	$X_{cp} \pm m$	<i>IR</i>	$X_{cp} \pm m$	<i>IR</i>	$X_{cp} \pm m$	<i>IR</i>
Диаметр наибольшего ствола в кусте, см	7,42±0,32	0,68	9,14±0,37	0,75	8,15±0,37	0,74	8,37±0,33	0,73
Высота куста, м	7,17±0,22	0,81	7,07±0,18	0,75	7,31±0,21	0,78	6,95±0,18	0,77
Диаметр кроны, м	5,97±0,18	0,81	6,71±0,22	0,86	6,22±0,21	0,87	6,89±0,20	0,84
Диаметр основания куста, м	0,78±0,04	0,71	0,85±0,04	0,68	0,75±0,04	0,62	0,88±0,04	0,77
Средний диаметр трех наибольших стволов в кусте, см	6,14±0,24	0,67	7,87±0,35	0,75	6,93±0,32	0,75	7,05±0,30	0,71
Побеги возрастом более 4 лет, шт.	9,84±0,38	0,67	12,55±0,58	0,85	10,55±0,43	0,72	11,76±0,57	0,80
Побеги возрастом до 4 лет, шт.	7,39±0,53	0,84	7,74±0,52	0,80	6,78±0,50	0,78	9,36±0,80	0,89
Общее количество побегов в кусте, шт.	17,23±0,70	0,73	20,29±0,87	0,80	17,33±0,71	0,74	21,12±1,07	0,84

Примечание:  $X_{cp}$  – среднее значение показателя; m – ошибка среднего значения.

Таблица 2

**Корреляция морфологических показателей крон лещины (коэффициент ранговой корреляции Спирмена)**

Показатель	Диаметр наибольшего ствола в кусте, см	Высота куста, м	Диаметр кроны, м	Диаметр основания куста, м	Средний диаметр трех наибольших стволов в кусте, см	Побеги возрастом более 4 лет, шт.	Побеги возрастом до 4 лет, шт.	Общее количество побегов в кусте, шт.
Диаметр наибольшего ствола в кусте, см	1							
Высота куста, м	0,67	1						
Диаметр кроны, м	0,67	0,56	1					
Диаметр основания куста, м	0,47	0,31	0,54	1				
Средний диаметр трех наибольших стволов в кусте, см	0,91	0,73	0,70	0,50	1			
Побеги возрастом более 4 лет, шт.	0,46	0,37	0,57	0,60	0,56	1		
Побеги возрастом до 4 лет, шт.	-0,01	-0,14	0,06	0,44	-0,02	0,18	1	
Общее количество побегов в кусте, шт.	0,29	0,15	0,40	0,67	0,35	0,75	0,76	1

*Густота и форма кроны, оценка индексов разнообразия.* Соотношение качественных показателей: густоты, формы кроны и индексов разнообразия для различных условий – представлено на рис. 1, 2.

Как следует из рис. 1, 2, оба показателя у лещины не зависят от высоты произрастания над уровнем моря (для формы кроны  $t_{\text{факт}} = 0,84$ ;  $t_{\text{ст}} = 7,82$ ; для густоты  $t_{\text{факт}} = 3,18$ ;  $t_{\text{ст}} = 7,82$ ). Морфологическое разнообразие также не имеет существенного отличия и составило для формы крон 8,97 %, для густоты – 7,07 %.

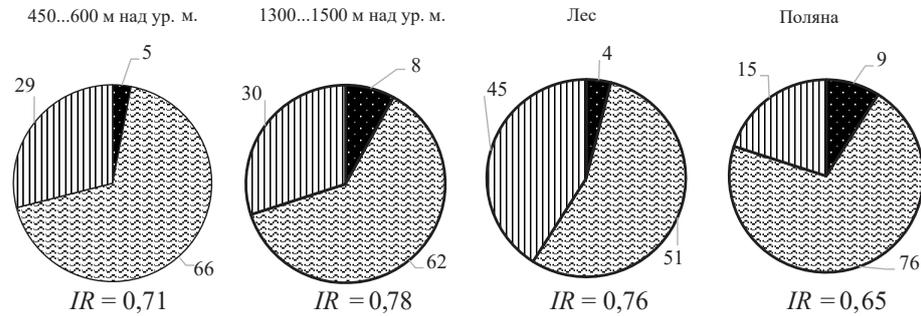


Рис. 1. Форма кроны у растений лещины, произрастающих в различных условиях: – округлая крона; – раскидистая крона; – прямая крона

Fig. 1. Crown shape of hazel plants growing in various conditions: – rounded; – spreading; – upright

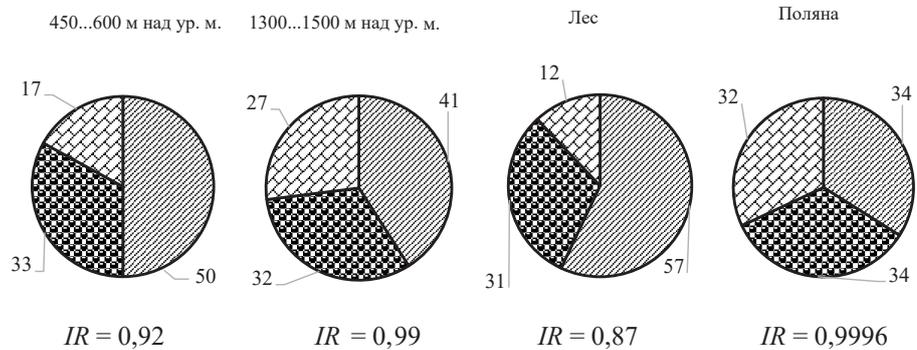


Рис. 2. Густота кроны у растений лещины, произрастающих в различных условиях: – редкая крона; – крона средней густоты; – густая крона

Fig. 2. Crown density of hazel plants growing in various conditions: – scarce; – medium density; – thick

Иное наблюдается в условиях «лес – поляна». В лесу, где освещенность ниже, у лещины прямостоящих кроны на 30 % больше, раскидистых на 25 % меньше ( $t_{\text{факт}} = 21,84$ ;  $t_{\text{ст}} = 7,82$ ), чем на поляне. Отличие связано с тем, что на полянах размер кроны на 10,77 % и число побегов на 21,3 % больше – разрастаясь, кроны и побеги искривляются, чаще образуя крону раскидистой формы. Особей с округлой кроной на лесных и полевых участках 4 и 9 % соответственно.

В лесных условиях при меньшем поступлении световой энергии у растений в 23 % случаев образуется редкая, а в 20 % – густая крона ( $t_{\text{факт}} = 15,04$ ;  $t_{\text{ст}} = 7,82$ ). Снижение густоты кроны под пологом леса отмечается у различных видов и другими авторами [1, 15]. Соотношение кроны средней густоты у лещины в рассматриваемых случаях было примерно одинаковым.

Индексы разнообразия в обоих случаях существенно различаются и составили для формы кроны 14,47 %, для густоты – 14,97 %.

В целом по комплексу количественных показателей морфологическое разнообразие для высоты 450...600 м над ур. м. составляет 0,74, для высоты 1300...1500 м над ур. м. – 0,78; для полян – 0,80, под пологом леса – 0,76. Несущественное отличие в первом случае составило 5,13 %, во втором – 5 %.

По качественным показателям индекс разнообразия для меньшей высоты равен – 0,815, для большей – 0,885. Различие в 7,91 % несущественно. Под пологом леса показатель равен 0,815, на полянах – 0,825. Отличие в 1,21 % незначительно.

Рассчитанный по объединенным выборкам обобщенный индекс морфологического разнообразия крон для высоты 450...600 м над ур. м. составил 0,86, для 1300...1500 м над ур. м. – 0,88; для условий леса – 0,87, поляны – 0,89. Различие, в первом случае на 2,27 %, во втором – на 2,24 %, было незначимо.

### *Выводы*

1. На высоте 1300...1500 м над ур. м. в условиях лучшего увлажнения по сравнению с участками, расположенными на высоте 450...600 м над ур. м., лещина имеет статистически достоверное лучшее развитие наибольшего ствола, большие средние диаметры трех основных стволов, кроны, количество побегов старше 4 лет, общее количество побегов в кусте. Высота кустов, средний диаметр их основания, численность побегов возрастом до 4 лет, форма и густота крон при уровне значимости 0,05 достоверных отличий не имели.

2. На полянах в условиях лучшего освещения по сравнению с условиями, складывающимися под пологом леса, растения лещины развивают больший диаметр кроны и основания куста, имеют превосходящее общее количество побегов до 4 лет и старше. Здесь лещины чаще образуют кусты с раскидистой и густой кроной. Между другими количественными показателями: диаметром наибольшего ствола, высотой куста и средним диаметром трех наибольших стволов – в изучаемых условиях достоверного отличия средних показателей не обнаружено.

3. Сильная корреляционная связь у лещины выявлена между средним диаметром трех наибольших стволов, высотой куста и диаметром наибольшего ствола, а также между общим количеством побегов в кусте и численностью побегов до 4 лет и старше. Практически отсутствует статистическая связь количества побегов возрастом до 4 лет, диаметра наибольшего ствола, среднего диаметра трех наибольших стволов, среднего диаметра крон, высоты куста и количества побегов старше 4 лет, а также общего количества побегов, высоты куста, диаметра наибольшего ствола. Другие изучаемые показатели связаны слабо и умеренно.

4. По высоте над уровнем моря значимо больший индекс разнообразия установлен только на верхних участках для среднего диаметра трех наибольших стволов в кусте лещины и количества побегов старше 4 лет. По остальным морфологическим признакам показатель не имел существенного отличия.

5. У лещины на полянах по сравнению с лещиной под пологом леса наблюдается значимо большее отличие индекса морфологического разнообразия по среднему диаметру основания куста, количеству побегов до 4 лет и старше, общему количеству побегов, густоте крон. По форме крон индекс разнообразия выше у лещин под пологом леса.

6. Обобщенные индексы разнообразия количественных, качественных и общих морфологических признаков кустов лещины не имели существенных от-

личий при сравнении их для различных высот, в условиях под пологом леса и на полянах.

7. Выявленные особенности крон позволят спрогнозировать закономерности развития растений лещины в различных условиях, послужат основой для дальнейшей оценки ее лесохозяйственных и экологических функций, отбора декоративных и других хозяйственно-ценных особей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арнольд Ф.К. Русский лес. Т. II. Ч. 1-я. СПб.: Изд. А.Ф. Маркса, 1898. 705 с. Arnold F.K. *Russian Forest*. Vol. II. Part 1. Saint Petersburg, Izdaniye A.F. Marksa, 1898. 705 p.
2. Баканов А.И. Количественные методы экологии и гидробиологии: сб. науч. тр., посвящ. памяти А.И. Баканова / отв. ред. Г.С. Розенберг. Тольятти: НЦ РАН, 2005. 404 с. Bakanov A.I. *Quantitative Methods of Ecology and Hydrobiology. Collection of Academic Papers Dedicated to the Memory of A.I. Bakanov*. Ed. by G.S. Rosenberg. Togliatti, SC RAS Publ., 2005. 404 p.
3. Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Исущева Т.А. Полиморфизм крон лещины обыкновенной в природной популяции // Новые технологии. 2020. № 1. С. 115–123. Biganova S.G., Sukhorukov Yu.I., Isushcheva T.A. Polymorphism of Common Hazel Crown in Natural Population. *Novye tehnologii* [New technologies], 2020, no. 1, pp. 115–123. DOI: <https://doi.org/10.24411/2072-0920-2020-10112>
4. Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Кулик К.Н., Кулик А.К. Разнообразие орехов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) и прогноз встречаемости ее форм на Северо-Западном Кавказе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 55–71. Biganova S.G., Sukhorukikh Yu.I., Kulik K.N., Kulik A.K. Diversity of Common Hazelnuts (*Corylus avellana* L.) and Occurrence Forecast of Its Forms in the North-Western Caucasus. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 55–71. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-55-71>
5. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. V. Плодовые, ягодные, субтропические, цитрусовые, орехоплодные культуры, виноград и чай. М.: Колос, 1970. 160 с. *Procedure for State Variety Testing of Agricultural Crops*. Iss. V. Fruit, Berry, Subtropical, Citrus, Nut-Bearing Crops, Grapes and Tea. Moscow, Kolos Publ., 1970. 160 p.
6. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Голуб В.Б., Хазиахметов Р.М. Экологическая классификация видов растений // Журн. общей биологии. 2018. Т. 79, № 1. С. 64–75. Mirkin B.M., Naumova L.G., Golub V.B., Khaziakhmetov R.M. Ecological Classifications of Plant Species. *Zhurnal obshchey biologii* [Journal of General Biology], 2018, vol. 79, no. 1, pp. 64–75.
7. Осипов В.Е. Лещина. М.: Агропромиздат, 1986. 63 с. Osipov V.E. *Hazel*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 63 p.
8. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / Рос. акад. с.-х. наук. Всерос. науч.-исслед. ин-т селекции плодовых культур; под общ. ред. Е.Н. Седова и Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК, 1999. 606 с. *Program and Methods of Varietal Study of Fruit, Berry and Nut-Bearing Crops*. Russian Academy of Agricultural Sciences. All-Russian Scientific Research Institute of Fruit Crops Breeding. Ed. by E.N. Sedov, T.P. Ogol'tsova. Orel, VNIISPK Publ., 1999. 606 p.
9. Программа Северо-Кавказского центра по селекции плодовых, ягодных, цветочно-декоративных культур и винограда на период до 2030 года / под ред. Е.А. Егорова. Краснодар: ГНУ СКЗНИИСиВ, 2013. 202 с. *Program of the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making for the Period up to 2030*. Ed. by E.A. Egorov. Krasnodar, FSBSI NCFSCSHVW Publ., 2013. 202 p.
10. Свидетельство № 2019620438 РФ о регистрации базы данных. Модели для оценки биоразнообразия на основе относительной энтропии: № 2019620349:

заявл. 4.03.2019: опубл. 20.03.2019 / С.Г. Биганова, Ю.И. Сухоруких. Biganova S.G., Sukhorukikh Yu.I. *Models for the Assessment of Biodiversity on the Basis of Relative Entropy*. Certificate of Registration of the Database RF no. RUS 2019620438, 2019.

11. Семенютина А.В., Свинцов И.П., Кулик К.Н., Петров В.И. Научные основы интродукции древесных видов методом родовых комплексов для обогащения дендрофлоры многофункциональных лесомелиоративных насаждений // Междунар. науч. школа «Парадигма»: сб. науч. ст. Т. 8: Биология. Химия. Земеделие. Варна: ЦНИИ «Парадигма», 2015. С. 167–189. Semeniyutina A.V., Svintsov I.P., Kulik K.N., Petrov V.I. Scientific Basis for the Introduction of Woody Species by Generic Complexes to Enrich Dendroflora Multipurpose Agroforestry Plantations. *International Scientific School "Paradigm": Collection of Academic Papers. Vol. 8: Biology. Chemistry. Arable Farming*. Varna, TsNII "Paradigma" Publ., 2015, pp. 167–189.

12. Серебряков И.Г., Доманская Н.П., Родман Л.С. О морфогенезе жизненной формы кустарника на примере орешника // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд.: Биологический. 1954. Т. LIX(2). С. 57–70. Serebryakov I.G., Domanskaya N.P., Rodman L.S. On the Morphogenesis of Bush Life Form Using Hazel as an Example. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskii* [Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series], 1954, vol. LIX(2), pp. 57–70.

13. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Майкопе. Справочно-информационный портал «Погода и климат». Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/37021.htm> (дата обращения: 18.02.22). Average Monthly and Annual Air Temperatures in Maykop. *Information and Reference Portal "Weather and Climate"*.

14. Сухоруких Ю.И., Биганова С.Г., Уджуху М.И., Орлов Б.П., Трушева Н.А., Черноштанов Н.А. Лесные плодовые виды Северо-Западного Кавказа. Т. 1. Кизил, лещина, облепиха, орех грецкий. Майкоп: Качество, 2010. 192 с. Sukhorukikh Yu.I., Biganova S.G., Udzhukhu M.I., Orlov B.P., Trusheva N.A., Chernoshchanov N.A. *Forest Fruit Species of the North-Western Caucasus*. Vol. 1. Cornel, Hazel, Sea Buckthorn and Common Walnut. Maykop, Kachestvo Publ., 2010. 192 p.

15. Тимофеев Т.И., Муратов В.А. Пищевые продукты и биологически активные добавки из орехов фундука современных сортов. Краснодар: КубГУ, 2017. 175 с. Timofeyenko T.I., Muratov V.A. *Food Products and Dietary Supplements of Hazelnuts of Modern Varieties*. Krasnodar, KubSU Publ., 2017. 175 p.

16. Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. 2-е изд. / под ред. И.С. Мелехова. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 600 с. Tkachenko M.E. *General Forestry*. Ed. by I.S. Melekhov. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1952. 600 p.

17. Хужахметова А.Ш., Семенютина А.В. Перспективы возделывания фундука в защитных лесонасаждениях // Земледелие. 2008. № 6. С. 16–17. Khuzhakhmetova A.Sh., Semeniyutina A.V. Prospects for Cultivation of Hazelnuts in Protective Forests. *Zemledelie*, 2008, no. 6, pp. 16–17.

18. Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовникова Н.А., Шувалова Е.Б. Теория статистики. 4-е изд., перераб и доп. / под ред. Р.А. Шмойловой. М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с. Shmoylova R.A., Minashkin V.G., Sadovnikova N.A., Shuvalova E.B. *Theory of Statistics*. Ed. by R.A. Shmoylova. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004. 656 p.

19. Щеглов Н.И., Щеглов С.Н., Кассанелли Д.П. Изменчивость морфологических признаков в природной популяции лещины обыкновенной (*Corylus avelana* L.) // Тр. КубГАУ. 2013. № 41. С. 112–114. Shcheglov N.I., Shcheglov S.N., Kassanelly D.P. Variability of Morphological Signs in Natural Population of Hazel (*Corylus avelana* L.). *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Kuban State Agrarian University], 2013, no. 41, pp. 112–114.

20. Щепотьев Ф.Л., Рихтер А.А., Павленко Ф.А., Молотков П.И., Кравченко В.И., Ирошников А.И. Орехоплодовые лесные культуры. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 256 с. Shchepot'yev F.L., Rikhter A.A., Pavlenko F.A., Molotkov P.I., Kravchenko V.I., Iroshnikov A.I. *Nut-Bearing Crops*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 256 p.

21. Blagoeva E., Nikolova M. Chemical Composition of Selected Hazelnut Cultivars. *Rastenievadni nauki* [Bulgarian Journal of Crop Science], 2009, vol. 46, no. 1, pp. 85–88.
22. Blagoeva E., Nikolova M., Kuzmanova I., Denev R., Panayotova S., Marekov I., Momchilova S. Fat Content and Fatty Acid Composition of Walnuts and Hazelnuts, Grown in Bulgaria. *Rastenievadni nauki* [Bulgarian Journal of Crop Science], 2011, vol. 48, no. 1, pp. 111–114.
23. Bostan S.Z. Important Chemical and Physical Traits and Variation in These Traits in “Tombul” Hazelnut Cultivar at Different Elevations. *Grasas y Aceites*, 2003, vol. 54, fasc. 3, pp. 234–239. DOI: <https://doi.org/10.3989/gya.2003.v54.i3.236>
24. Bregaglio S., Orlando F., Ascari L., Castagna A., Fabrizi F., Lisperguer M.J., Novara C., Suarez E., De Gregorio T. Preliminary Application of a Simulation Model to Reproduce Hazelnut Development and Growth in Italy, Georgia and Chile. *Acta Horticulturae*, vol. 1226, pp. 189–196. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1226.28>
25. Contini M., Baccelloni S., Massantini R., Anelli G. Extraction of Natural Antioxidants from Hazelnut (*Corylus avellana* L.) Shell and Skin Wastes by Long Maceration at Room Temperature. *Food Chemistry*, 2008, vol. 110, iss. 3, pp. 659–669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.060>
26. Franco S., Marongiu S. A District for Hazelnut Sector: Rural or Agro-Food System? Analysis of National and Regional Laws for the Governance of Monti Cimini (Italy). *Acta Horticulturae*, 2009, vol. 845, pp. 775–782. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.845.122>
27. Korac M., Cerovic S., Golosin B., Korac J., Ninic-Todorovic J., Almasi R., Balaz J. *Leska*. Novi Sad, Technosoft, 2000. 101 p.
28. Mirotadze N., Gogitidze V., Mikadze N., Goginava L., Mirotadze M. Agro-Ecological Zones of Hazelnut in Georgia. *Acta Horticulturae*, 2009, vol. 845, pp. 291–294. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.845.43>
29. Muehlbauer M., Molnar Th. Hazelnuts, a Potential New Crop for the Northeast: An Update on the Rutgers University Breeding Program. *Fruit Notes*, 2014, vol. 79, no. 4, pp. 1–3.
30. Pourbabaei H., Adel M.N. Plant Ecological Groups and Soil Properties of Common Hazel (*Corylus avellana* L.) Stand in Safagashteh Forest, North of Iran. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 245–250. DOI: <https://doi.org/10.1515/ffp-2015-0026>
31. Ricotta C. Through the Jungle of Biological Diversity. *Acta Biotheoretica*, 2005, vol. 53, pp. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10441-005-7001-6>
32. Xie M., Zheng J.L., Wang D.M. Achievements and Perspective in Hazelnut Breeding in China. *Acta Horticulturae*, 2014, vol. 1052, pp. 41–43. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1052.4>

УДК 630.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-73-83

## THE POTENTIAL IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE DISTRIBUTION OF NORWAY SPRUCE (*Picea abies* Karst.) IN BOSNIA AND HERZEGOVINA

**Boban Miletić<sup>1</sup>**, PhD Student, Senior Teaching Assistant; ResearcherID: [AAW-1785-2021](https://orcid.org/0000-0002-4543-3665),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4543-3665>

**Branislav Drašković<sup>1</sup>**, PhD in Geography, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAW-4998-2021](https://orcid.org/0000-0003-0628-0472),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0628-0472>

**Todor Đorem<sup>1</sup>**, PhD Student, Teaching Assistant; ResearcherID: [AAW-1937-2021](https://orcid.org/0000-0001-6082-6048),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6082-6048>

**Stefan Bojić<sup>1</sup>**, PhD Student, Senior Teaching Assistant; ResearcherID: [AAW-2457-2021](https://orcid.org/0000-0002-8733-3080),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-3080>

**Bratislav Matović<sup>2</sup>**, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AAW-4304-2021](https://orcid.org/0000-0002-4664-6355),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4664-6355>

**Dejan B. Stojanović<sup>2</sup>**, PhD in Biology; ResearcherID: [AAW-4912-2021](https://orcid.org/0000-0003-2967-2049),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2967-2049>

<sup>1</sup>University of East Sarajevo, Vuka Karadžića 30, Lukavica, East Sarajevo, 71126, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina; e-mail: boban.miletic@pof.ues.rs.ba, branislav.draskovic@pof.ues.rs.ba, todor.djorem@pof.ues.rs.ba, stefan.bojic@pof.ues.rs.ba, univerzitet@ues.rs.ba

<sup>2</sup>University of Novi Sad, Antona Čehova, 13D, Novi Sad, 21102, Republic of Serbia; e-mail: bratislav.matovic@gmail.com, dejan.stojanovic@uns.ac.rs, ilfe@uns.ac.rs

---

Original article / Received on September 1, 2020 / Accepted on November 10, 2020

---

**Abstract.** As forests in Bosnia and Herzegovina cover 2,904,600 ha or 56.7 % of its total area, and since the meteorological data analysis for the period 1961–2014 shows that the mean annual temperature maintains a continuous rise, close attention should be paid to these fragile ecosystems. It is important to note that one of the most economically valuable species for forestry in Bosnia and Herzegovina, Norway spruce, is particularly endangered due to its very low drought resistance and spread of various diseases. Comparing the last climate sequence (1991–2019) with the previous one (1961–1990) we found that the spruce-inhabited areas showed an average increase in the values of the Forest Aridity Index of 0.929. As for the Ellenberg's climate quotient, it is noticeable that climate change is not as strong as in the case of the Forest Aridity Index. Based on projections for the mid- (2041–2070) and late-century (2071–2100) under the RCP 4.5, there will be no change that is likely to significantly affect the distribution of spruce. The predicted rates of decline and altitudinal shifts of favorable habitats are negligible. On the contrary, projections under the RCP 8.5 predict a significant reduction of suitable habitats, both for the existing range of Norway spruce and the entire territory of Bosnia and Herzegovina. Particularly, late-century projection under the RCP 8.5 predicts an almost complete reduction of suitable habitats, while small areas of suitable habitats at higher elevations will remain intact.

**For citation:** Miletić B., Drašković B., Đorem T., Bojić S., Matović B., Stojanović D.B. The Potential Impact of Climate Change on the Distribution of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) in Bosnia and Herzegovina. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 73–83. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-73-83

**Keywords:** Norway spruce, ROC-analysis, climate change, distribution, RCP scenarios.

**ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА  
НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЕЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ (*Picea abies* Karst.)  
В БОСНИИ И ГЕРЦЕГОВИНЕ**

**Бобан Милетич**<sup>1</sup>, аспирант, ст. ассистент; ResearcherID: [AAW-1785-2021](https://orcid.org/0000-0002-4543-3665),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4543-3665>

**Бранислав Драшкович**<sup>1</sup>, канд. геогр. наук, доц.; ResearcherID: [AAW-4998-2021](https://orcid.org/0000-0003-0628-0472),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0628-0472>

**Тодор Джорем**<sup>1</sup>, аспирант, ассистент; ResearcherID: [AAW-1937-2021](https://orcid.org/0000-0001-6082-6048),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6082-6048>

**Стефан Бойич**<sup>1</sup>, аспирант, ст. ассистент; ResearcherID: [AAW-2457-2021](https://orcid.org/0000-0002-8733-3080),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-3080>

**Братислав Матович**<sup>2</sup>, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [AAW-4304-2021](https://orcid.org/0000-0002-4664-6355),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4664-6355>

**Деян Б. Стоянович**<sup>2</sup>, канд. биол. наук; ResearcherID: [AAW-4912-2021](https://orcid.org/0000-0003-2967-2049),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2967-2049>

<sup>1</sup>Университет Восточного Сараево, ул. Вука Караджича, д. 30, г. Лукавица, Восточное Сараево, Республика Сербская (Босния и Герцеговина), 71126;

e-mail: boban.miletic@pof.ues.rs.ba, branslav.draskovic@pof.ues.rs.ba,  
todor.djorem@pof.ues.rs.ba, stefan.bojic@pof.ues.rs.ba, univerzitet@ues.rs.ba

<sup>2</sup>Нови-Садский университет, ул. Антона Чехова, д. 13Д, г. Нови-Сад, Республика Сербия, 21102; e-mail: bratislav.matovic@gmail.com, dejan.stojanovic@uns.ac.rs, ilfe@uns.ac.rs

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 01.09.20 / Принята к печати 10.11.20

**Аннотация.** Леса в Боснии и Герцеговине занимают 2 904 600 га, или 56,7 % от общей площади страны. Анализ метеорологических данных за 1961–2014 гг. показывает, что среднегодовая температура воздуха продолжает постоянно повышаться, поэтому лесным экосистемам следует уделять пристальное внимание. Одним из важнейших видов для лесного хозяйства Боснии и Герцеговины является ель обыкновенная. Этот вид находится под угрозой исчезновения из-за его очень низкой засухоустойчивости и подверженности различным заболеваниям. Сравнивая последний климатический период (1991–2019 гг.) с предыдущим (1961–1990 гг.), мы обнаружили, что в покрытых елями районах наблюдалось увеличение значений индекса засушливости леса (FAI) в среднем на 0,929. Климатический коэффициент Элленберга (EQ) существенно не изменился. Согласно прогнозам на середину (2041–2070 гг.) и конец века (2071–2100 гг.) в соответствии со сценарием RCP 4.5 значительного влияния климата на распространение ели не будет. Прогнозируемые темпы уменьшения площади и высотные сдвиги благоприятных местообитаний незначительны. Прогнозы в соответствии со сценарием RCP 8.5 предсказывают весомое сокращение благоприятных местообитаний для ели обыкновенной как на территории существующего ареала вида, так во всей Боснии и Герцеговине. В частности, прогноз на конец века (RCP 8.5) показывает почти полное исчезновение благоприятных для произрастания ели мест, в то время как небольшие участки, подходящие для этого дерева, расположенные выше, чем остальные, над уровнем моря, останутся нетронутыми.

**Для цитирования:** Miletic B., Drašković B., Djorem T., Bojić S., Matović B., Stojanović D.B. The Potential Impact of Climate Change on the Distribution of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.) in Bosnia and Herzegovina // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 73–83. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-73-83

**Ключевые слова:** ель обыкновенная, ROC-анализ, изменение климата, распространение ели, сценарии RCP.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

### *Introduction*

According to the Second State Forest Inventory in Bosnia and Herzegovina, forests cover 2,904,600 ha or 56.7 % of its total area [1]. One of the three most economically important species for forestry in Bosnia and Herzegovina is Norway spruce [7, 17], which is particularly endangered as a result of its very low drought resistance [28] and the spread of various diseases [4]. Spruce rarely occurs alone as an edicator, most often in communities with fir or beech and fir [7]. According to the Second State Forest Inventory in Bosnia and Herzegovina, these forests cover 702,200 ha [1] or 24.18 % of the total forested area. Generally, after the retreat of glaciers (10–12 thousand years ago), first of all birch started to expand its area to the north, and then pine and spruce appeared 7,000 years ago. Over the next 5–6 thousand years, the area of spruce expanded significantly all over the continent [32].

Currently, due to unfavorable influences of abiotic and biotic factors, there is a decreasing trend in the area under spruce, and the species is considered biologically weaker compared to other species from the communities they build together [7, 23]. It's interesting that in mixed spruce-fir stands on well-drained and rich soils, fir mostly outgrows spruce and can temporarily suppress it under its canopy and even displace spruce from the stand [28]. One of the main reasons for forest successions is climate change. Special attention should be paid to years with extreme climatic conditions, such as years with droughts and forest fires, which are accompanied by a decrease in groundwater level. The same consequences can be observed as a result of severe frosts in snowless winters, when even spruce stands, especially its undergrowth, can die on a mass scale. The main reason for a very low drought resistance of spruce can be found in the fact that its roots are located in the upper soil horizons [28]. Kolesnikov [15] saw the main reason for the dieback of spruce forests in the impact of periodic spring-summer droughts that can cause the death of old stands. According to Melekhov [21], regardless of the type of succession, the strong exogenic factors, such as sharp increase in temperature, lead to the replacement of shade-tolerant species by light-demanding species. In the Caucasus, there is an active succession where spruce is replaced by aspen, birch and hornbeam [21].

In the past two decades the seasonal rainfall and rainfall distribution are much disrupted in Bosnia and Herzegovina, which along with rising temperatures causes problems with droughts and floods. Analysis of meteorological data for the period 1961–2014 shows that the mean annual temperature maintains a continuous rise. The increase in annual air temperature ranges from 0.4 to 1.0 °C, while the increase in temperature during the growing season (April–September) even reaches 1.0 °C. As a consequence of global warming, more frequent occurrence of extremes is expected through climate change, threatening the functioning of forest ecosystems [24]. Taking into account the above facts, it is extremely important to monitor and, to the extent that modern technology and science allow, to predict possible effects of climate change on forest ecosystems. The main purpose of this paper is to point out the potential changes in horizontal and vertical distribution of Norway spruce in Bosnia and Herzegovina.

### *Objects and Methods of Research*

Data on the spatial distribution of Norway spruce were downloaded from the website of the Joint Research Center of the European Commission

(<https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/FISE>). The data according to de Rigo et. al. [10] were computed using the FISE harmonised European dataset of taxa presence/absence and available in raster form for the area of Europe (EU28 plus part of other countries within the spatial extent). In this case, the spatial distribution of forest species was estimated through statistical interpolation based on the integration and harmonization of various datasets, such as European national forest inventories and pan-European projects: BioSoil, Forest Focus/Monitoring, EUFGIS, GeneticDiversity [10].

For this analysis, the Norway spruce distribution raster was processed in the statistical environment R Studio [27] using the packages “base” [27], “rgeos” [3], “rgdal” [2] and “raster” [14] to obtain vector and raster distribution data for Bosnia and Herzegovina, especially the binary distribution raster. The process of making this raster is based on the definition of mixed stands which indicates that all stands in which the number of trees of a certain species is less than 10 % are considered pure [16], whereby such a presence of the observed species can be defined as marginal. Accordingly, the climatic characteristics of the area where the marginal presence of spruce is recorded cannot indicate the conditionality of its occurrence with specific climatic characteristics, because its presence in such areas may be due to microclimatic conditions. Thus, a binary distribution raster is obtained by reclassification, where the number 1 (one) denotes all pixels that have a value equal to or greater than 0.10 (10 %), i.e. the value that according to de Rigo et. al. [9] is characterized by a medium-low presence probability of the selected species, and the number 0 (zero) denotes all other values.

Climate data for the observed period (1990–2019) were taken from the E-OBS gridded dataset v21.0 [6], while the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate scenarios were selected for the mid- and late-century projections [18]. To illustrate the past and present climate we used the Forest Aridity Index (FAI) suggested by Führer E. et al. [13] and Ellenberg’s climate quotient (EQ) suggested by Ellenberg H.H. [11]:

$$\text{FAI} = \frac{100 \frac{T_{\text{VII}} + T_{\text{VIII}}}{2}}{P_{\text{V}} + P_{\text{VI}} + 2P_{\text{VII}} + P_{\text{VIII}}};$$

$$\text{EQ} = \frac{T_{\text{VII}}}{P_a} \cdot 1000,$$

where,  $T_{\text{VII}}$ ,  $T_{\text{VIII}}$  – average temperature in the selected periods, °C;  $P_{\text{V}}$ ,  $P_{\text{VI}}$ ,  $P_{\text{VII}}$ ,  $P_{\text{VIII}}$  – average precipitation in the selected periods, mm;  $P_a$  – annual average precipitation, mm; V, VI, VII, and VIII – selected periods, months.

Climate data processing was also performed in the statistical environment R Studio [27] using some of the above packages, such as “base” [27] and “raster” [14], with “ncdf4” [22] package to manage netCDF file of E-OBS gridded dataset.

To examine the ability of the FAI and EQ to predict the presence of Norway spruce, the Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis was performed using the “pROC” [26] package. The usual approach in the ROC analysis implies that the predictive probability map is compared with the actual binary event map, with various thresholds applied to the probability map to produce a sequence of binary predicted event maps and to assess the coincidence between predicted and true events [19]. The resulting ROC curve is defined as a two-dimensional graph showing the relationship between sensitivity (true positive rate) and specificity (true negative rate) [33].

One of the objectives of the ROC analysis is to examine whether it deviates statistically significantly from the reference line, the one passing through the middle of the graph [25], which is expressed using a summary metric called area under the curve (AUC) that connects the points obtained by the various thresholds [19]. One point in the ROC chart can be considered superior than the other if it is located more towards the “northwest” [12], i.e. when the proportion of true positives and true negatives is higher. Accordingly, we have used a point (threshold) that maximizes the sum of sensitivity and specificity [8, 30]. To determine whether the obtained point (threshold) has a discriminating ability to explain the distribution of Norway spruce we have used classification by Yang and Berdine [33] where values of AUC <0.5 indicate non-existent discrimination, 0.5–0.6 – poor discrimination, 0.6–0.7 – acceptable discrimination, 0.7–0.8 – excellent discrimination, and >0.9 – outstanding discrimination. To eliminate the possibility of error as little as possible, we have omitted indices with less than excellent discrimination from the prediction analysis.

To evaluate the range of the FAI and EQ within Norway spruce distribution, descriptive statistics for the Norway spruce distribution was calculated using “raster” [14] and “base” [27] packages. To show the trends of the FAI and EQ in the analyzed areas, we calculated the difference between the FAI and EQ mean values of the reference (1991–2019) and past (1961–1990) climate sequences. Determination of mean altitude within spruce distribution, as well as assessment of altitudinal shifts of climatically suitable habitats, was performed in R Studio [27], using packages “raster” [14], “rgdal” [2], “base” [27] on the basis of Digital Elevation Model which was used by Marchi et al. [18] to create RCP datasets. Final processing of raster and vector data, i.e. their visualization, was performed in GIS software ArcMap 10.5.

### *Results and Discussion*

When we talk about the mean values of the FAI and EQ, it is extremely important to define which climatic conditions expressed through these indices are favorable for the development of Norway spruce. According to Führer et al. [13] the FAI values less than 4.75 define climatic conditions conducive to European beech growth and development. Considering that Norway spruce in Bosnia and Herzegovina often shares the habitat with European beech and Silver fir [29], we can assume that this classification of the FAI, to a certain extent, corresponds to the ecological needs of Norway spruce. These statements are consistent with the results of the research carried out by Stojanović D.B. et al. [31] in Serbia, which showed that Norway spruce corresponds to a slightly humid climate (FAI = 4.00) compared to European beech (FAI = 5.6). Therefore, our results for the previous climate series indicate that the areas where the presence of Norway spruce was recorded are still classified as climatically optimal FAI = 4.150 (table 1). However, comparing the last climate sequence (1991–2019) with the previous one (1961–1990) we found that there was an increase in the FAI values in areas where Norway spruce is present, 0.929 on average (table 1). This is very important as Führer et al. [13] state that the FAI values in the range of 4.75–6.00 are defined as climate suitable for the development of pedunculate oak and hornbeam, which suggests that the climatic conditions for Norway spruce, in terms of optimality, deteriorated during the last climate sequence (table 1). In this case, the Norway spruce suitable habitat narrows in favor of species that prefer a slightly arid climate. When it comes to extremes, there is a tendency for the maximum values

to increase significantly more than the minimum values (table 1). A logical explanation for this phenomenon can be found in the fact that the maximum values are located in areas with lower altitudes that are first exposed to climate change.

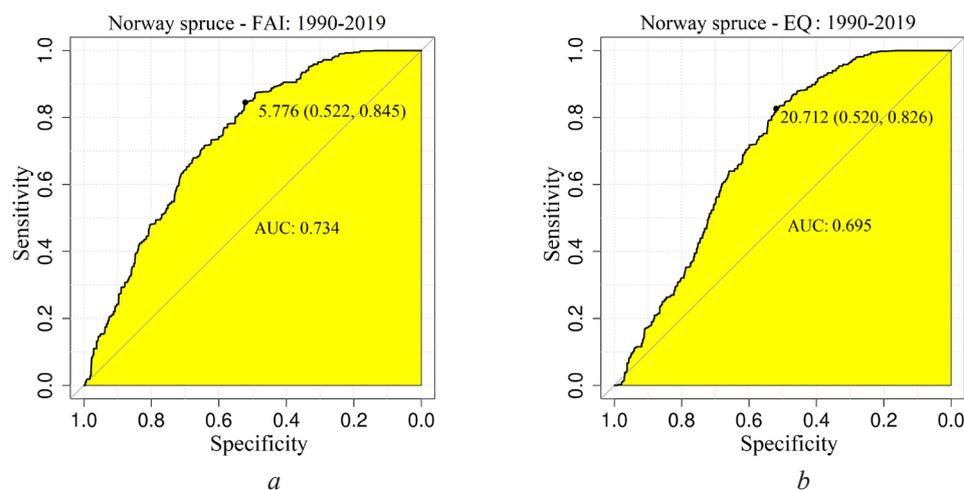
Table 1

## Observed climate change

Descriptive statistics	FAI			EQ		
	1961–1990	1991–2019	$\Delta$	1961–1990	1991–2019	$\Delta$
Minimum	3.077	3.648	0.571	12.654	13.696	1.042
Mean	4.150	5.079	0.929	16.758	18.430	1.672
Maximum	6.001	7.510	1.509	24.605	26.617	2.012
Range	2.924	3.862	0.938	11.951	12.921	0.970
Standard deviation	0.603	0.773	0.170	2.412	2.675	0.263

Analyzing the obtained values of the EQ in the reference periods (1961–1990 and 1991–2019), it is noticeable that climate change is not expressed to a large extent, as in the case of the FAI (table 1). Since the value of the EQ less than 20 indicates favorable conditions for the growth and development of European beech [11], we can conclude that the changes recorded by this index are not of great importance for Norway spruce (table 1).

*Determination of the FAI and EQ predictive ability.* According to the ROC analysis (fig. 1), the FAI has excellent discrimination ability to explain the distribution of Norway spruce in Bosnia and Herzegovina. The spatial accuracy of the obtained threshold of the FAI (84.52 %) (table 2) is at a satisfactory level and in accordance with the obtained discrimination ability. In the case of the EQ discrimination ability is classified as acceptable, and the EQ is therefore omitted from further analysis (fig. 1).

Fig. 1. The ROC graphs: *a* – FAI; *b* – EQ

To find out why the EQ gave slightly worse results compared to the FAI, see the findings of a similar survey for Montenegro carried out by Matović B. [20]. According to the author, the problem arises in the fact that areas affected by the Adriatic climate (in our case predominantly the region of Herzegovina) have large amounts of precipitation outside the vegetation period, which do not have a direct impact on the growth of forest trees, and thus systematically reduce the values of the EQ. Consequently, there is a decrease in sensitivity and specificity, which leads to a decrease in AUC and discrimination ability.

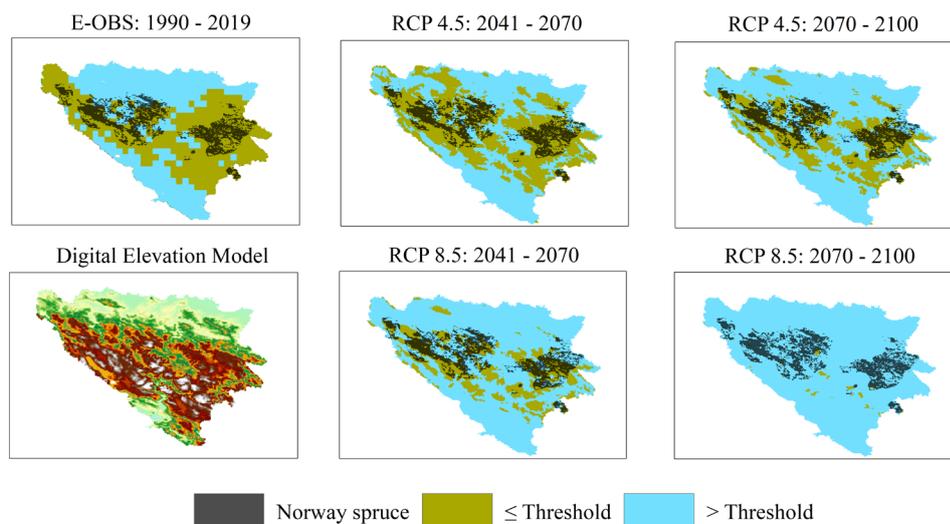


Fig. 2. Map of the current forest tree species distribution over the FAI maps for projected climate (RCP 8.5 for periods 2041–2070 and 2071–2100)

*Norway spruce distribution projections based on the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate scenarios.* As shown in fig. 2, the climate scenario RCP 4.5 for the mid- (2041–2070) and late-century (2071–2100) does not predict significant changes in the FAI in areas inhabited by Norway spruce. Moreover, the mid-century projection predicts a slight increase (7.15 %), while the late-century projection predicts a slight decrease (-6.57 %) in climate-suitable habitats within the existing range of Norway spruce (table 2 and fig. 1).

According to the mentioned scenario (RCP 4.5) and its mid- and late-century projections, there will be no significant shifts (or narrowing) of climatically suitable habitats to higher altitudes (table 3). As for the entire territory of Bosnia and Herzegovina, climate scenarios predict slightly more intense shifts. The projections under the RCP 4.5 climate scenario predict a shift up to 169.31 m or narrowing of climatically suitable habitats, which is also indicated by a decrease in the standard deviation (table 3). In this case, it is noticeable that climatically unsuitable areas are spreading to the detriment of suitable ones, predominantly in areas with lower altitudes around the inner Dinaric Alps, which is not of great importance for Norway spruce due to its absence in these areas (fig. 4). This phenomenon is especially evident under the RCP 4.5 late-century projection (table 1).

Table 2

**Relative difference between observed and projected climatically suitable habitats calculated on the basis of the FAI**

Climatic sequence		Existing distribution		In Bosnia and Herzegovina	
		%			
E-OBS	1990–2019	84.52		53.26	
RCP 4.5 Δ	2041–2070	+7.15		-4.97	
	2071–2100	-6.57		-35.59	
RCP 8.5 Δ	2041–2070	-22.67		-49.89	
	2071–2100	-99.98		-98.31	

Table 3

**Absolute difference between altitudes of climatically suitable habitats in the observed and future periods, calculated on the basis of the FAI**

Climatic sequence		Existing distribution		In Bosnia and Herzegovina	
		m			
		MEAN	SD	MEAN	SD
E-OBS	1990–2019	1007.49	258.53	896.43	372.55
RCP 4.5 Δ	2041–2070	-8.02	-5.84	+38.48	-12.98
	2071–2100	+43.52	-35.38	+169.31	-68.25
RCP 8.5 Δ	2041–2070	+96.03	-60.16	+254.49	-101.19
	2071–2100	+548.03	-146.06	+806.94	-237.27

Contrary to the above projections, the RCP 8.5 shows extremely worrying results. The mid-century projection predicts a level of reduction that will be up to five times higher than the value predicted by the late-century projection under the RCP 4.5. Nevertheless, the late-century projection (2070–2100) under the RCP 8.5 shows the worst results. In this case, the reduction of climate-friendly habitats, within the existing range of Norway spruce, will be almost complete (table 2 and fig. 1). To a somewhat greater extent, the reductions of suitable habitats are more pronounced on the entire territory of Bosnia and Herzegovina, with the expansion of climatically unsuitable habitats having the same direction as in the case of the mid-century projection under the RCP 4.5. According to the RCP 8.5, habitats suitable for Norway spruce will be reduced to smaller areas at higher altitudes (table 3). The main reason for this lies in the fact that in such areas there is a higher average amount of precipitation. These results are in line with the results obtained by Buras A. and Menzel A. [5], which also state that according to the RCP 8.5 Norway spruce will withdraw from its habitats in Southeast Europe towards higher altitudes in the Alps and the Carpathians. Also, the mentioned authors claim that according to the RCP 4.5, there will be significantly milder changes in terms of spruce distribution, which is in line with our results.

### *Conclusion*

The climate scenario RCP 4.5 for the mid- (2041–2070) and late-century (2071–2100) does not predict significant changes in the FAI in areas inhabited by Norway spruce, and there will be no significant shifts (or narrowing) of climatically suitable habitats to higher altitudes.

Contrary to the above projections, the RCP 8.5 shows that the mid-century projection predicts a level of reduction that will be up to five times higher than the value predicted by the late-century projection under the RCP 4.5. In this case, the reduction of climate-friendly habitats, within the existing range of Norway spruce, will be almost complete on the entire territory of Bosnia and Herzegovina.

According to the RCP 4.5 and RCP 8.5, habitats suitable for Norway spruce will be reduced to areas at higher altitudes.

#### REFERENCES

1. Ballian D., Božić G. *Biokemijska varijabilnost smreke (Picea abies Karst) u Bosni i Hercegovini* [Biochemical Variability of Spruce (*Picea abies* Karst) in Bosnia and Herzegovina]. Sarajevo, UŠIT FBiH, 2018. 224 p.
2. Bivand R., Keitt T., Rowlingson B., Pebesma E., Sumner M., Hijmans R., Baston D., Rouault E., Warmerdam F., Ooms J., Rundel C. *rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library*. R Package Version 1.5-12. 2020. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal> (accessed 10.11.20).
3. Bivand R., Rundel C., Pebesma E., Stuetz R., Hufthammer K.O., Giraudoux P., Davis M., Santilli S. *rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS')*. R package version 0.5-3. 2020. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=rgeos> (accessed 10.11.20).
4. Bojić S., Pap P., Gutalj M., Stanković Neđić M., Miletić B., Stjepanović S., Đorem T., Zlatković M. Fungi Linked to Die-Back and Decay of Norway Spruce Stands in Bosnia and Herzegovina. *Book of Proceedings of the XI International Scientific Agriculture Symposium "AGROSYM 2020"*. Jahorina, 2020, pp. 1174–1082.
5. Buras A., Menzel A. Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 2019, vol. 9, art. 1986. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01986>
6. Cornes R.C., van der Schrier G., van den Besselaar E.J.M., Jones P.D. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, iss. 17, pp. 9391–9409. DOI: <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
7. Cvjetković B. *Genetical and Physiological Variability of Norway Spruce (Picea abies Karst.) in Progeny Tests in Bosnia and Herzegovina*. Dissertation. Belgrade, University of Belgrade, 2018.
8. Czúcz B., Gálhidy L., Mátyás C. Present and Forecasted Xeric Climatic Limits of Beech and Sessile Oak Distribution at Low Altitudes in Central Europe. *Annals of Forest Science*, 2011, vol. 68, pp. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0011-4>
9. De Rigo D., Caudullo G., Houston Durrant T., San-Miguel-Ayánz J. The European Atlas of Forest Tree Species: Modelling, Data and Information on Forest Tree Species. *European Atlas of Forest Tree Species*. Ed. by J. San-Miguel-Ayánz, D. de Rigo, G. Caudullo, T. Houston Durrant, A. Mauri. Luxembourg, 2016, pp. 40–45. Available at: <https://w3id.org/mtv/FISE-Comm/v01/e01aa69> (accessed 10.11.20).
10. De Rigo D., Caudullo G., San Miguel-Ayánz J. *Distribution Map of Picea abies (2006, FISE, C-SMFAv0-3-2)*. European Commission, Joint Research Centre, 2016. Available at: <http://data.europa.eu/89h/24362f17-7935-4a27-8cac-7a6e5b37bae8> (accessed 10.11.20).
11. Ellenberg H.H. *Vegetation Ecology of Central Europe*. Cambridge, Cambridge University Press, 1988. 731 p.
12. Fawcett T. An Introduction to ROC Analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2006, vol. 27, iss. 8, pp. 861–874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>

13. Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A., Szabados I. Application of New Aridity Index in Hungarian Forestry Practice. *Időjárás*, 2011, vol. 115, no. 3, pp. 205–216.
14. Hijmans J.R. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. R Package Version 3.0-12. 2020. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf> (accessed 10.11.20).
15. Kolesnikov B.P. *Forest Vegetation in the South-Eastern Part of the Vychegda Basin*. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 215 p.
16. Krstić M., Čevrljaković B. A Contribution to the Sessile Oak Site and Beech Site Defining in Central Serbia. *Glasnik Sumarskog fakulteta* [Bulletin of the Faculty of Forestry], 2009, iss. 100, pp. 143–158. DOI: <https://doi.org/10.2298/GSF0900143K>
17. Lojo A., Balić B. Prikaz površina šuma i šumskih zemljišta [Overview of Forest Areas and Forest Lands]. *Stanje šuma i šumskih zemljišta u Bosni i Hercegovini nakon provedene Druge inventure šuma na velikim površinama u periodu 2006 do 2009 godine* [The State of Forests and Forest Lands in Bosnia and Herzegovina after the Second Forest Inventory on Large Areas in the Period 2006 to 2009]. Ed. by A. Lojo, B. Balić, M. Hočevar, S. Vojniković, Ć. Višnjjić, J. Music, S. Delić, T. Treštić, A. Čabaravdić, S. Gurda, A. Ibrahimspahić, M. Dautbašić, O. Mujezinović. 2011, pp. 34–48.
18. Marchi M., Castellanos-Acuña D., Hamann A., Wang T., Ray D., Menzel A. ClimateEU, Scale-Free Climate Normals, Historical Time Series, and Future Projections for Europe. *Scientific Data*, 2020, vol. 7, art. 428. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0>
19. Mas J.-F., Soares Filho B., Pontius R.G., Farfán Gutiérrez M., Rodrigues H. A Suite of Tools for ROC Analysis of Spatial Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2013, vol. 2, iss. 3, pp. 869–887. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi2030869>
20. Matović B. *Analyzes and Projections of the Impact of Climate Change Using the Regional Climate Model on the Future Distribution and Growth of the Main Tree Species in Montenegro*. Final Report Ref. No. UNDP MNE 13-026. 2013, pp. 1–45.
21. Melekhov I.S. *Forestry*. Moscow, MGUL Publ., 2004. 398 p.
22. Pierce D. *ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files*. R Package Version 1.17. 2019. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4> (accessed 10.11.20).
23. Pintarić K. *Silviculture Properties and Life of Important Species of Forest Trees*. Bosnia and Herzegovina, Association of Forestry Engineers and Technicians of the Federation of BiH, 2002, pp. 111–116.
24. Radusin S., Medić V., Cero M., Abdurahmanovic I., Avdić S. *Third National Communication and Second Biennial Update Report on Greenhouse Gas Emissions of Bosnia and Herzegovina*. UNFCCC, 2016. 258 p.
25. Repišti S. Roc Krive U Psihološkoj Statistici Na Primjeru Potencijala Osobina Ličnosti Za Distinkciju Iznadprosječno I Ispodprosječno Optimističnih Osoba [ROC Curves in Psychological Statistics in the Case of Personality Traits' Potential to Distinguish Upper-Optimistic and Lower-Optimistic People]. *IMO-Istraživanje matematičkog obrazovanja*, 2014, vol. VI, Brij. 11, pp. 19–30. DOI: <http://dx.doi.org/10.7251/IMO1411019R>
26. Robin X., Turck N., Hainard A., Tiberti N., Lisacek F., Sanchez J.-C., Müller M. pROC: An Open-Source Package for R and S+ to Analyze and Compare ROC Curves. *BMC Bioinformatics*, 2011, vol. 12, art. 77. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-77>
27. RStudio Team. *RStudio 1.3.1093: Integrated Development Environment for R*. Boston, MA, RStudio, PBC, 2020. Available at: <http://www.rstudio.com/> (accessed 10.11.20).
28. Rysin L.P., Savel'yeva L.I. *Spruce Forests of Russia*. Moscow, Nauka Publ., 2002. 335 p.

29. Stefanović V., Beus V., Burlica Č., Dizdarević H., Vukorep I. *Ekološko-vegetacijska rejonizacija Bosne i Hercegovine* [Ecological and Vegetation Regionalization of Bosnia and Herzegovina]. Sarajevo, Šumarski fakultet u Sarajevu, 1983, pp. 1–49.

30. Stojanović D.B., Kržič A., Matović B., Orlović S., Duputic A., Djurdjević V., Galić Z., Stojnić S. Prediction of the European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Xeric Limit Using a Regional Climate Model: An Example from Southeast Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, vol. 176, pp. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.03.009>

31. Stojanović D.B., Matović B., Orlović S., Kržič A., Trudić B., Galić Z., Stojnić S., Pekeč S. Future of the Main Important Forest Tree Species in Serbia from the Climate Change Perspective. *SEEFOR*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.15177/see-for.14-16>

32. Valk U.A., Eylart Y.H. *Estonian Forests*. Tallinn, Valgus, 1974.

33. Yang S., Berdine G. The Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve. *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles*, 2017, vol. 5, no. 19, pp. 34–36. DOI: <https://doi.org/10.12746/swrccc.v5i19.391>

УДК 528.854(630\*2)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-84-104

## ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА

*С.А. Зотов<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [AAN-7199-2020](https://orcid.org/0000-0002-3483-1449),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3483-1449>*

*Е.В. Дмитриев<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [E-4794-2014](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5363-3934>*

*П.Г. Мельник<sup>3,4</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>*

*Т.В. Кондранин<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук; ResearcherID: [K-9407-2013](https://orcid.org/0000-0003-3565-3194),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3565-3194>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет); Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия, 141701; e-mail: zotov.sa@mipt.ru, kondr@kondr.rector.mipt.ru

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, Россия, 119333; e-mail: yegor@mail.ru

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 1-я Институтская ул., д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; e-mail: melnik\_petr@bk.ru

<sup>4</sup>Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Россия, 143030; e-mail: melnik\_petr@bk.ru

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 26.03.20 / Принята к печати 03.08.20

**Аннотация.** Рассматривается задача повышения информативности тематической обработки мультиспектральных изображений среднего (10–30 м) и высокого (1–4 м) пространственного разрешения, получаемых зарубежными и отечественными спутниковыми системами дистанционного зондирования Земли, за счет привлечения дополнительной текстурной информации с панхроматических спутниковых изображений сверхвысокого пространственного разрешения ( $\approx(1-0,4)$  м). Объектом исследования стали изображения тестовых полигонов на территории Савватьевского лесничества (Тверская обл.) со спутников Landsat 8, Sentinel 2 и WorldView 2, оснащенных мультиспектральной аппаратурой. Для валидации результатов расчетов использованы геопривязанные данные наземных обследований. В качестве спектральных признаков взяты значения спектральной отражательной способности в каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, нормализованные на соответствующую интегральную характеристику. В целях извлечения текстурных признаков на основе распределения совместной встречаемости уровней серого (текстурные признаки Харалика) в пределах скользящего окна, пробегающего с заданным пространственным шагом изображение, вычисляли статистические характеристики. Проведен корреляционный анализ текстурных признаков с учетом изменений расстояния и угла смежности. Для выбранных определяющих признаков: автокорреляции, асимметрии, контраста и корреляции – показано, что первые три могут быть использованы с произвольным выбранным направлением смежности, а последний необходимо рассматривать в двух различных направлениях. Установ-

лено, что при решении задачи распознавания природных и антропогенных объектов все рассмотренные алгоритмы классификации обеспечивают существенное повышение точности при совместном использовании спектральных и текстурных признаков по сравнению с традиционной спектральной классификацией. Этот результат продемонстрирован для всех полученных различными спутниками изображений тестовых полигонов. Можно сделать предварительный вывод, что предлагаемый комплексный подход тематической обработки позволяет повысить качество распознавания объектов в случае использования изображений как среднего, так и высокого пространственного разрешения. Оценки, полученные при построении тематических карт доминантных и субдоминантных отделов лесной растительности, показали близкие точности классификации по различным исходным мультиспектральным изображениям (с разбросом не более 5 % около среднего значения 85 %). По большей части это связано с наличием специфических погрешностей результатов наземной лесной таксации и говорит о необходимости их актуализации с применением данных дистанционного спутникового зондирования.

**Для цитирования:** Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Кондранин Т.В. Повышение информативности мультиспектральных спутниковых изображений с использованием данных текстурного анализа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 84–104. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-84-104

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00370 «Фундаментальные проблемы повышения информативности обработки данных оптоэлектронных авиакосмических устройств высокого пространственного и спектрального разрешения».

**Ключевые слова:** распознавание образов, информативность, дистанционное зондирование, мультиспектральные изображения, почвенно-растительный покров, тематическая обработка, лесная таксация.

## INCREASING THE INFORMATIVITY OF MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES USING TEXTURE ANALYSIS DATA

**Sergey A. Zotov**<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAN-7199-2020](https://orcid.org/0000-0002-3483-1449),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3483-1449>

**Egor V. Dmitriev**<sup>1,2</sup>, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [E-4794-2014](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5363-3934>

**Petr G. Melnik**<sup>3,4</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

**Timofey V. Kondranin**<sup>1</sup>, Doctor of Physics and Mathematics; ResearcherID: [K-9407-2013](https://orcid.org/0000-0003-3565-3194),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3565-3194>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation; e-mail: zotov.sa@mipt.ru, kondr@kondr.rector.mipt.ru

<sup>2</sup>Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, ul. Gubkina, 8, Moscow, 119333, Russian Federation; e-mail: yegor@mail.ru

<sup>3</sup>Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russian Federation; e-mail: melnik\_petr@bk.ru

<sup>4</sup>Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoe, Moscow Region, 143030, Russian Federation; e-mail: melnik\_petr@bk.ru

---

Original article / Received on March 26, 2020 / Accepted on August 3, 2020

---

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

**Abstract.** The article considers the problem of increasing the informativity of multispectral images of medium (10–30 m) and high (1–4 m) spatial resolution obtained from foreign and national satellite remote sensing systems by involving additional textural information from panchromatic satellite images of very high spatial resolution ( $\approx 1-0.4$  m). The images of test sites on the territory of Savvat'yevo forestry (Tver region) from Landsat 8, Sentinel 2 and WorldView 2 satellites equipped with multispectral instruments were an object of this research. Geo-referenced ground survey data were used to validate the calculation results. We used the values of the spectral reflectance in the visible and near-infrared channels normalized to the appropriate integral characteristic as spectral features. Statistical characteristics were calculated in order to extract texture features based on the distribution of the co-occurrence of gray levels (Haralick texture features) within a moving window running the image with a given spatial step. A correlation analysis of textural features was carried out considering changes in distance and angle of adjacency. It was shown that for the selected leading features (autocorrelation, asymmetry, contrast and correlation) the first three can be used with an arbitrary direction of adjacency, while the latter needs to be considered in two different directions. Also we have found that all the considered classification algorithms provide a significant increase of accuracy when both spectral and textural features are used, in comparison with the traditional spectral classification. This result was shown for all images of test sites obtained by different satellites. It is possible to make a preliminary conclusion that the proposed integrated approach of thematic processing can improve the quality of object recognition in the case of using images of both medium and high spatial resolution. Estimates obtained during the thematic mapping of dominant and subdominant forest species showed close classification accuracies for different initial multispectral images (with a scatter of no more than 5 % around the average value of 85 %). Mostly this is due to the presence of specific errors in the ground-based forest inventory data and indicates the necessity of their updating with the use of satellite remote sensing images.

**For citation:** Zotov S.A., Dmitriev E.V., Melnik P.G., Kondranin T.V. Increasing the Informativity of Multispectral Satellite Images Using Texture Analysis Data. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 84–104. DOI: 10.17238/issn0536-1036-2022-2-84-104

**Funding:** The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research; project No. 20-07-00370 “Fundamental Problems of Improving the Informativity of Data Processing of Optoelectronic Aerospace Devices with High Spatial and Spectral Resolution”.

**Keywords:** pattern recognition, informativity, remote sensing, multispectral images, soil and vegetation cover, thematic processing, forest inventory.

### Введение

В настоящее время мультиспектральные спутниковые изображения среднего (10–30 м) и высокого (1–4 м) пространственного разрешения (ПР) широко используются для дистанционного мониторинга почвенно-растительного покрова [14]. Преимуществами изображений среднего разрешения являются возможность регулярно получать информацию о состоянии исследуемых объектов на выбранной территории и большая скорость тематической обработки [19]. Спутниковые изображения высокого разрешения обеспечивают высокую детализацию объектов, однако при практическом использовании таких данных возникают связанные с их значительной коммерческой стоимостью трудности.

При оценке состояния растительности широкое распространение получили технологии обработки мультиспектральных изображений в каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов с применением концепции вегетационных индексов [1, 5, 9]. Многочисленные исследования показали, что одной из наиболее сложных проблем при использовании данной концепции становится выявление структурных особенностей и динамики изменений лесного полога. В частности, в работе [9] предложен статистический метод восстановления сомкнутости полога и индекса листовой поверхности хвойных лесов центральной части Канады с использованием относительного и нормализованного разностного вегетационных индексов. Точность дистанционного определения сомкнутости полога и индекса листовой поверхности, как было доказано, существенно варьирует в зависимости от периода вегетации и условий наблюдения (углов визирования), вызывая трудности интерпретации результатов тематической обработки.

Альтернативный подход основан на решении обратной задачи переноса излучения в системе «лесной полог – атмосфера». Одной из первых, в которой продемонстрирован данный подход, была работа [12], где индекс листовой поверхности восстанавливался по мультиспектральным изображениям со спутника Landsat ETM+ (ПР – 30 м) на основе прямого моделирования отражательной способности лесного полога в спектральных каналах прибора ETM.

В последующие годы с использованием мультиспектральных данных Landsat TM и Landsat ETM+ был разработан стандартный продукт Landsat TCC [21], представляющий собой глобальную карту распределения площади проективного покрытия лесной растительности. Валидация Landsat TCC с применением данных наземных обследований полигонов на территории Финляндии [16] показала достаточно приемлемые с потребительской точки зрения точности определения проективного покрытия леса ( $\approx 85\%$ ). Важно подчеркнуть, что при оценке качества определения структурных параметров древостоев, в том числе и проективного покрытия, необходимо учитывать возможность ошибки в данных наземных обследований [20].

В последние годы в эксплуатацию введены современные спутниковые системы, такие как WorldView, Quickbird, Pléiades. На спутниках этих серий установлены мультиспектральная (8 (WorldView) и 4 (Quickbird и Pléiades) канала диапазоном 400–1000 нм, ПР – 2–3 м в надире) и панхроматическая аппаратура (ПР  $\approx 0,5$ –0,7 м), система Sentinel (12 каналов диапазоном 400–2500 нм, ПР – 10, 20 и 60 м), а также система Cartosat, имеющая только панхроматическую стереокамеру (ПР – 2,7 м). Открываются новые возможности совместного использования мультиспектральных и панхроматических данных, получаемых синхронно в режиме реального времени, причем подчеркнем, что ПР мультиспектральных изображений систем WorldView, Quickbird и Pléiades в разы выше ПР классических систем типа Landsat и современных Sentinel.

К настоящему времени выполнен ряд исследований, посвященных использованию высокодетальной текстурной информации при тематической обработке мультиспектральных изображений; рассмотрены различные схемы совместной спектрально-текстурной обработки дистанционных данных применительно к оценке состояния растительного покрова [6, 11, 13]. Показана эффективность использования дополнительной текстурной информации

для повышения точности классификации характеристик лесной растительности в различных климатических условиях – во влажных тропических лесах [13] и смешанных лесах центральных регионов России [11]. Важно отметить, что получаемые при таком подходе более надежные оперативные данные о лесотаксационных характеристиках (размерах крон, высоте и диаметре деревьев) используются в дальнейшем для решения важных прикладных задач лесопользования: определения биопродукционных параметров лесных территорий на большой по размеру площади.

Цель работы – исследование возможностей повышения точности тематической обработки мультиспектральных спутниковых изображений среднего и высокого пространственного разрешения совместно с высокодетальной текстурной информацией, получаемой современными оперативными спутниковыми системами в виде координатно-привязанных панхроматических изображений сверхвысокого пространственного разрешения. Также ставится задача сравнения эффективности применения мультиспектральных данных среднего и высокого пространственного разрешения для мониторинга почвенно-растительного покрова при использовании различных методов автоматизированной обработки.

#### *Объекты и методы исследования*

Мультиспектральные спутниковые системы дистанционного зондирования в заданном для конкретной аппаратуры наборе узких спектральных каналов обеспечивают получение изображений наблюдаемых объектов, представляемых в виде так называемого спектрального куба данных с двумя пространственными и одной спектральной координатой.

В качестве признаков спектральной координаты в данной работе используется набор спектральных яркостей пикселей в каналах конкретной спутниковой аппаратуры. Для каждого пикселя производится нормализация спектральных яркостей на интегральную яркость в канале, что позволяет существенно сгладить разброс данных, связанный, например, с изменением условий освещения.

При вычислении текстурных признаков применяется статистический подход [4], согласно которому описание текстуры изображения основано на вычислении двумерной функции вероятности совместной встречаемости уровней серого в заданном направлении [17]:

$$p(i, j) = \frac{\text{GLCM}(i, j)}{\sum_{i, j=1}^N \text{GLCM}(i, j)}$$

Элементами матрицы GLCM ( $i, j$ ) (англ. Gray-Level Co-occurrence Matrix) являются частоты появления пары пикселей с яркостями  $i$  и  $j$  ( $N$  – число уровней серого). Пиксели расположены на расстоянии  $d$  (в пикселях) друг от друга и образуют угол смежности  $\alpha$  с заданным референсным направлением.

Матрица GLCM рассчитывается для частей обрабатываемого панхроматического изображения, попадающих внутрь скользящего окна. Центр окна пробегает пиксели основного панхроматического изображения. Ширина окна подбирается в зависимости от характерных размеров обследуемых объектов и

пространственного разрешения дистанционных данных. При обработке изображений лесных территорий ряд авторов рекомендуют использование скользящего окна шириной от 20 до 80 пикс. [2, 3].

На основе  $p(i, j)$  рассчитываются статистики, известные как текстурные признаки Харалика [18]. Нами рассматривается 19 текстурных признаков Харалика, наиболее часто используемых при текстурном анализе изображений [8, 17]: автокорреляция, островершинность, асимметрия, контраст, корреляция, энтропия разности, дисперсия разности, неоднородность, энергия, энтропия, однородность, однородность 2, информационная мера корреляции 1, информационная мера корреляции 2, максимальная вероятность, среднее суммы, энтропия суммы, сумма квадратов, дисперсия суммы.

Для эффективного применения текстурных признаков Харалика при классификации объектов подстилающей поверхности требуется достаточно высокое ПР обрабатываемых изображений, т. е. размер пикселя должен быть существенно меньше характерного размера текстурных элементов обследуемых объектов.

Мультиспектральные изображения, получаемые с современных спутниковых систем, как правило, имеют более низкое ПР, чем панхроматические. Однако применение более крупного шага движения панхроматического окна позволяет повысить эффективность совместной обработки обоих изображений. В алгоритмах, реализованных в настоящей работе, центр скользящего окна пробегает каждый пиксель многоспектрального изображения с одновременным «вырезанием» части соответствующего панхроматического изображения. В результате изображения текстурных признаков добавляются к спектральным признакам соответствующего пикселя изображения из центра скользящего окна. Далее классификация проводится по спектральным и текстурным признакам совместно [6].

В основе алгоритмов классификации лежат методы машинного обучения с учителем, суть которых в том, что определенные числовые параметры алгоритма оцениваются по так называемой обучающей выборке – множеству из  $m$  пар признаков  $x \in X$  и соответствующих им наименований  $y \in Y$ .

В качестве классификаторов рассмотрены следующие алгоритмы:  $k$ -ближайших соседей ( $k$ -nearest neighbors (kNN)) [10, 15], «случайный лес» (random forest (RF)) [7], квадратичного дискриминантного анализа (quadratic discriminant analysis (QDA)) [23].

В алгоритме kNN объект входит в класс, к которому принадлежит большинство из  $k$ -ближайших соседей обучающей выборки. В формализованном виде это условие записывается так:

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [y_{(i)} = y] w(i, x),$$

где  $a(x) \in Y$  – номер класса, определяемого по вектору признаков;  $[y_{(i)} = y]$  – индикаторная функция;  $w(i, x)$  – весовая функция  $i$ -го элемента обучающей выборки по отношению к классифицируемому вектору признаков  $x$ . В нашем случае после перегруппировки обучающей выборки в порядке увеличения расстояния от  $x$  весовая функция представима в виде  $w(i, x) = [i \leq k]$ .

Необходимым элементом kNN-алгоритма является определение «расстояния» между объектами, для чего в общем случае в пространстве признаков объектов вводится метрика из набора существующих, например Евклидова, Манхэттенская или Чебышевская. С учетом специфики координатной привязки

изображений в работе используется Евклидова метрика, весовые коэффициенты принимаются одинаковыми для всех соседей.

Не менее важной проблемой kNN-алгоритма является правильный выбор количества ближайших соседей  $k$ , которое подбиралось нами таким образом, чтобы при обработке эталонных объектов точность классификации была наибольшей. kNN-алгоритм прост для реализации, но в то же время для обеспечения приемлемых точностей классификации необходимы повышенная репрезентативность обучающей выборки и, как следствие, высокие вычислительные затраты.

Алгоритм «случайный лес» основан на построении «леса» из  $N$  «решающих деревьев» заданной глубины, каждое из которых обучается на случайной подгруппе обучающей выборки [7]. Композиция из  $N$ -алгоритмов  $b_1(x), \dots, b_N(x)$  является, по существу, регрессионным алгоритмом, усредняющим результаты обработки каждого из этих алгоритмов. Композицию алгоритмов  $b_1(x), \dots, b_N(x)$  можно представить в виде

$$a(x) = \text{sign} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N b_n(x).$$

Количество деревьев в лесу и их глубина подбираются таким образом, чтобы точность классификации, обрабатываемой на эталонных объектах, была наибольшей. RF-алгоритм имеет относительно малую склонность к переобучению, в минимальной степени подвержен влиянию шумов и выбросов. К его недостаткам, помимо указанных для kNN-алгоритма, следует отнести высокую сложность реализации.

Алгоритм QDA – это частный случай байесовского классификатора. Формализм QDA в общем случае описывается в виде

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} P_y p_y(x).$$

Здесь  $P_y$  – это априорная вероятность класса  $y$ , т. е. вероятность события появления (существования) этого класса вне зависимости от причин, формирующих реализацию  $x$ . Распределение признаков внутри класса  $y$  характеризуется функцией условной плотности распределения вероятности  $p_y(x)$ .

В случае, если признаки каждого класса описываются нормальными распределениями, что имеет место при решении многих прикладных задач,

$$a(x) = \arg \max_{y \in Y} \left[ 2 \ln P_y - (x - \mu_y)^T \Sigma_y^{-1} (x - \mu_y) - \ln(\det(\Sigma_y)) \right],$$

байесовский классификатор сводится к формуле

где  $\mu_y$  – математическое ожидание вектора признаков;  $\Sigma_y$  – ковариационная матрица признаков, определяемых для класса  $y$  [22].

По сравнению с алгоритмами kNN и RF алгоритм QDA требует меньших вычислительных затрат.

Для обработки методики использовали мультиспектральные изображения среднего и высокого ПР и панхроматические сверхвысокого ПР территорий Савватьевского лесничества (Тверская обл.), для которых есть данные наземной лесной таксации, необходимые для валидации результатов тематической обработки спутниковых изображений.

На рис. 1 представлено изображение полигона с таксационными выделами и контурами, используемыми в численных экспериментах по совместной обработке мультиспектральных и панхроматических изображений.

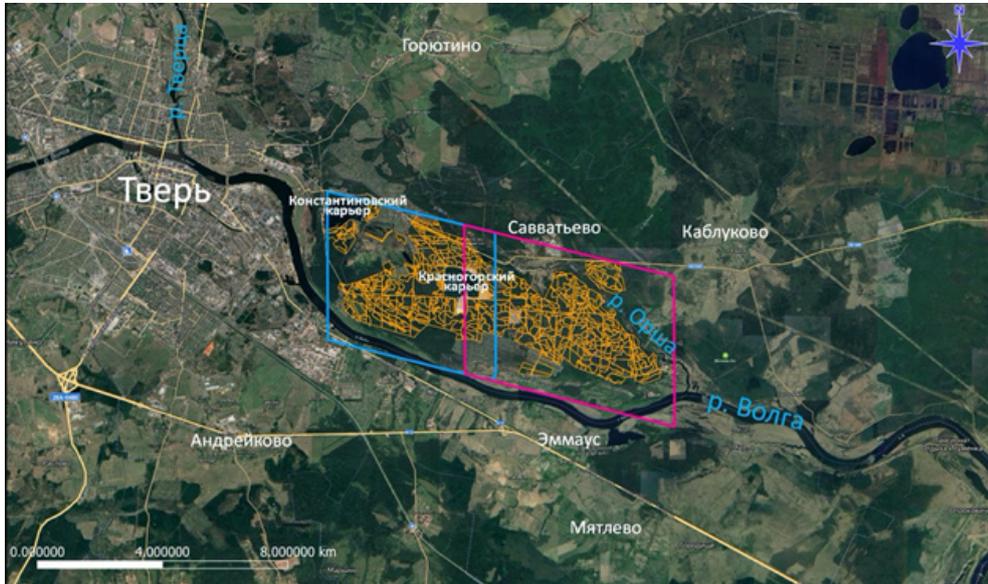


Рис. 1. Тестовый участок на территории Савват'евского лесничества (Тверская обл.): желтые линии – границы таксационных выделов, синяя и фиолетовая рамки – контуры используемых изображений WorldView 2

Fig. 1. Test site on the territory of Savvat'yevskoye forestry (Tver region): yellow lines – boundaries of inventory plots; blue and purple frames – bounding boxes of the WorldView 2 images used

Согласно данным лесной таксации на территории Савват'евского лесничества преобладают две породы: береза и сосна. Примесь остальных пород незначительна, что затрудняет их представление в обучающей выборке. Поэтому деревья классифицировали на лиственные и хвойные породы, представленные в подавляющем большинстве березой и сосной. Рассматриваемый тестовый участок содержал 604 выдела, в 460 из которых доминировали хвойные породы, а в оставшихся 144 – лиственные.

В качестве источника спектральных данных о поверхности выбранной территории использованы мультиспектральные снимки трех разных спутников: Landat 8, Sentinel 2, WorldView 2.

В табл. 1 приведены каналы, их номера в списке каналов соответствующего спутника ( $N$ ), спектральные диапазоны ( $\Delta\lambda$ ) и пространственные разрешения ( $\Delta x$ ). Все эти значения использовались далее в качестве информативных признаков для классификации.

Для вычисления текстурных признаков в рамках численного эксперимента взяты два снимка от 25.06.2016 с разрешением 0,46 м, сделанных панхроматической камерой WorldView 2.

Таблица 1

**Каналы мультиспектральных спутниковых систем, выбранные в качестве информативных признаков**

Канал	Landsat 8			Sentinel 2			WorldView 2		
	$N$	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta x$ , м	$N$	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta x$ , м	$N$	$\Delta\lambda$ , мкм	$\Delta x$ , м
Blue	2	0,452–0,512	30	2	0,458–0,523	10	2	0,450–0,510	1,84
Green	3	0,533–0,590	30	3	0,543–0,578	10	3	0,510–0,580	1,84
Red	4	0,636–0,673	30	4	0,650–0,680	10	5	0,630–0,690	1,84
NIR-1	5	0,851–0,879	30	8	0,788–0,903	10	7	0,770–0,895	1,84
NIR-2	–	–	–	–	–	–	8	0,860–0,940	1,84
SWIR-1	6	1,566–1,651	30	11	1,565–1,655	20	–	–	–
SWIR-2	7	2,107–2,294	30	12	2,100–2,280	20	–	–	–

*Результаты исследования и их обсуждение*

Комбинация мультиспектральных и панхроматических снимков полностью отражает полигон. Перед вычислением текстурных признаков яркости обрабатываемого панхроматического изображения градуируются таким образом, чтобы минимальное значение яркости было 0, а максимальное – 100. Тестирование показало, что дальнейшее увеличение числа градаций яркости существенно не влияет на текстурные признаки.

Каждый из 19 текстурных признаков возможно вычислить при разных расстояниях  $d$  и углах  $\alpha$ . Такое количество признаков при классификации бывает избыточным, поэтому проводится отбор информативных признаков. Текстурные признаки проверяются на информативность: вычисляются их значения при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $d = 1$  по объектам, входящим в сбалансированную обучающую выборку, которая включает в себя объекты, характерные для выбранной местности: лиственный лес, хвойный лес, луговая растительность, вода, песок, массивы жилых домов. Термин «сбалансированная выборка» означает равенство количества объектов каждого класса. Также отметим, что в ходе тестирования различных моделей был установлен наилучший результат при ширине скользящего окна 80 пикс., поэтому данная ширина использовалась для вычисления текстурных признаков.

Для определения информативности каждого признака по всем статистикам вычисляется корреляционная матрица Спирмена, представленная на рис. 2.

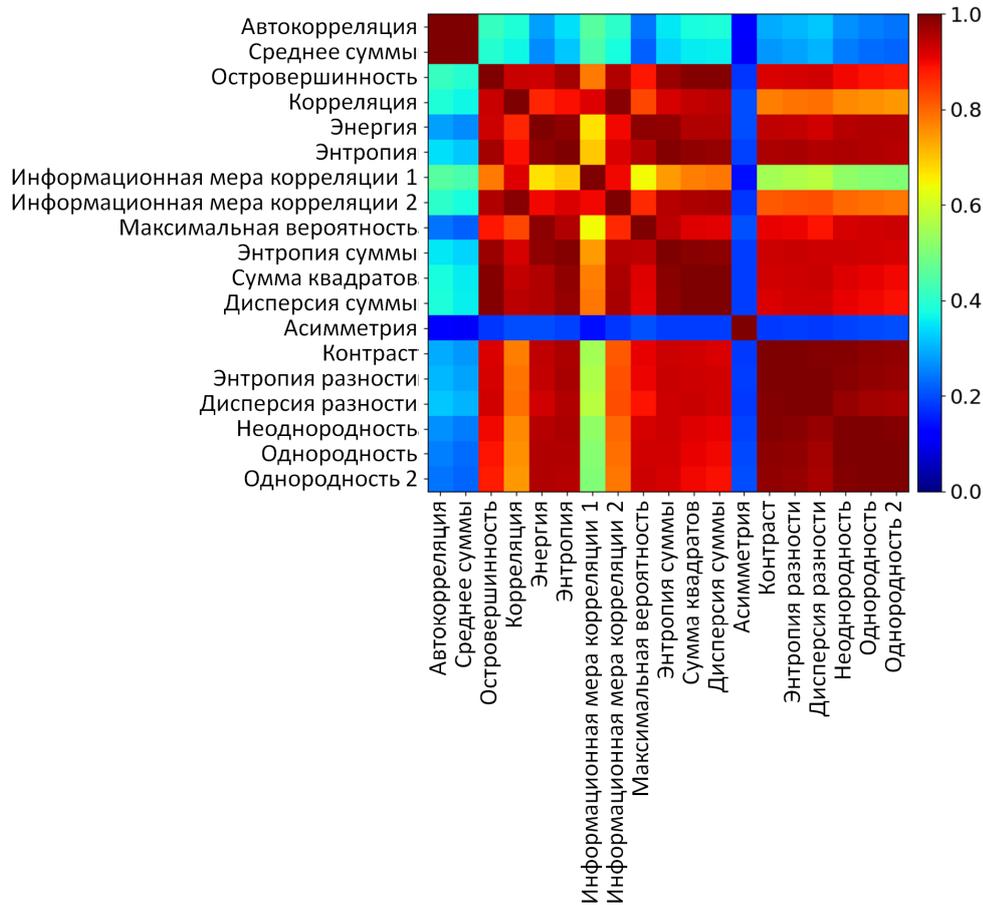


Рис. 2. Корреляционная матрица Спирмена в абсолютных значениях, полученная по статистикам текстурных признаков с углом  $\alpha = 0^\circ$  и расстоянием  $d = 1$ . Текстурные признаки вычислены по объектам сбалансированной обучающей выборки

Fig. 2. Absolute Spearman correlation matrix derived from the texture feature statistics with angle  $\alpha = 0^\circ$  and distance  $d = 1$ . The texture features were calculated for the objects of the balanced training set

Если коэффициент корреляции Спирмена двух признаков близок к +1 или -1, то эти признаки имеют линейную зависимость и только один из них является информативным. Корреляция Спирмена была выбрана, потому что она более устойчива к выбросам. Также корреляция Спирмена в отличие от корреляции Пирсона не меняется значительно при различных сбалансированных обучающих выборках.

Считаем, что признаки линейно зависимы при корреляции Спирмена между наборами их значений более 0,9 в абсолютном значении. Тогда при вычислении значений признаков по сбалансированной обучающей выборке можно выделить следующие группы линейно зависимых признаков (в том числе группы, состоящие из одного признака): автокорреляцию, среднее суммы; острровершинность, корреляцию, энергию, энтропию, информационную меру корреляции 1, информационную меру корреляции 2, максимальную вероятность, энтропию суммы, сумму квадратов, дисперсию суммы; асимметрию;

контраст, энтропию разности, дисперсии разности, неоднородность, однородность, однородность 2.

Для проведения спектрально-текстурной тематической обработки из каждой группы выбирается по одному признаку. По нашим предварительным оценкам, изменение признаков, выбираемых из выделенных групп, не влечет за собой значимых изменений результатов расчетов. Таким образом, выбор из группы произволен. При отборе наиболее информативных признаков будут участвовать следующие текстурные признаки Харалика: автокорреляция, контраст, асимметрия, корреляция.

Эти текстурные признаки будут называться базовыми. Для оценки влияния параметра  $\alpha$  на значение каждого из них вычисляется корреляционная матрица Спирмена по статистикам с разным углом  $\alpha$  (0, 45, 90 и 135°), расстоянием  $d$ , равным 1. Получившиеся матрицы представлены на рис. 3, а.

Угол  $\alpha$ , по нашему мнению, существенно влияет на текстурный признак, вычисляемый при коэффициентах корреляции Спирмена больше 0,9 в абсолютном значении.

Анализ корреляционных матриц показывает:

автокорреляция не зависит от значения  $\alpha$ ;

контраст и асимметрия не зависят существенно от значения  $\alpha$ ;

корреляция при  $\alpha = 135^\circ$  существенно отличается от значений при остальных  $\alpha$ . При этом в среднем корреляция этого признака при  $\alpha = 135^\circ$  одинакова с корреляцией при других  $\alpha$  (значения корреляционных матриц могут колебаться, т. к. балансировка тестовой выборки осуществляется случайным образом).

Поэтому в отборе признаков для классификации будут участвовать отдельно значения текстурного признака «корреляция», вычисленные при  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 135^\circ$  (далее помечено как  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 135^\circ$  соответственно).

Аналогичный анализ значимости параметра  $d$  при вычислении базовых признаков позволяет обнаружить, что базовые признаки существенно не зависят от  $d$ , если оно равно 1, 2, 3. Корреляционные матрицы Спирмена, вычисленные по статистикам базовых текстурных признаков с расстояниями  $d$  от 1 до 3, представлены на рис. 3, б. По этим матрицам был подтвержден вывод об отсутствии существенной зависимости базовых текстурных признаков от  $d$ .

Итак, в отборе признаков для классификации будут участвовать следующие текстурные признаки Харалика: автокорреляция, контраст, асимметрия, корреляция ( $\alpha = 0^\circ$ ), корреляция ( $\alpha = 135^\circ$ ).

Далее для каждого набора данных и метода классификации производится поэтапный отбор признаков. На первом этапе методом полного перебора подбираются спектральные признаки по максимальной точности на некоторой тестовой выборке. На втором этапе, если в рамках тестируемой модели спектральные признаки используются с текстурными, то аналогично подбирается набор базовых текстурных признаков, дополняющих отобранные спектральные признаки.

Все тестируемые в рамках численного эксперимента модели различаются по методам классификации / алгоритмам (3 варианта), используемым наборам спектральных данных (3 варианта), использованию (или неиспользованию) текстурных данных совместно со спектральными (2 варианта).

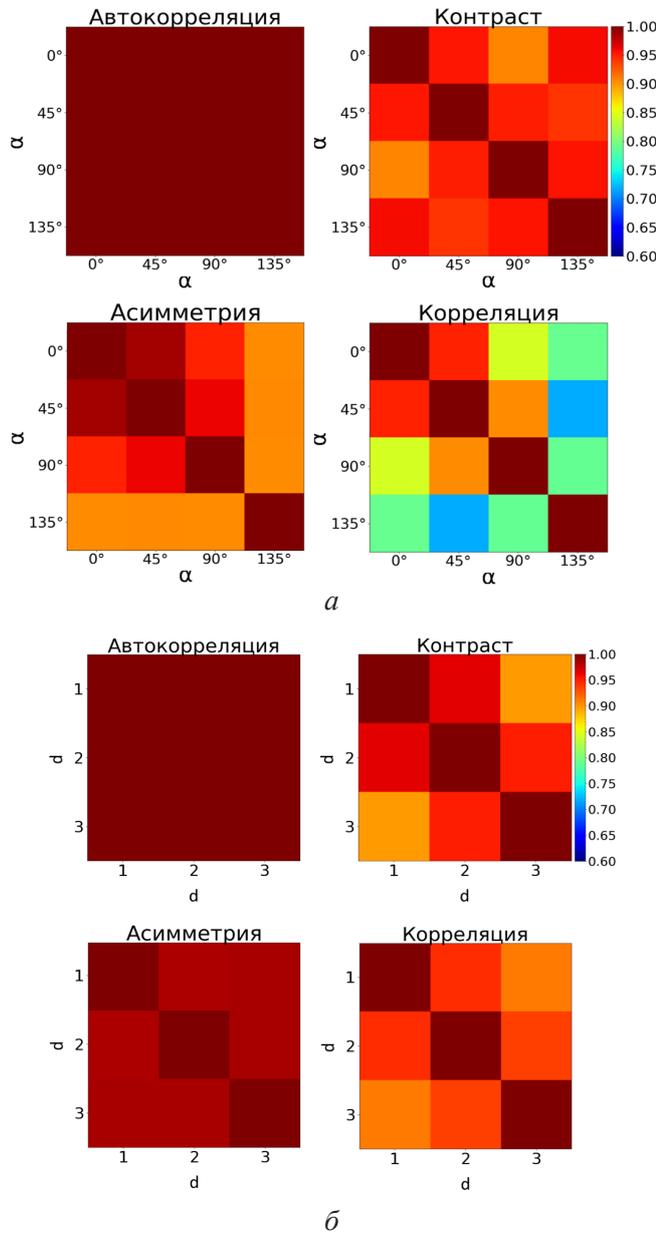


Рис. 3. Корреляционные матрицы Спирмена в абсолютных значениях, полученные по статистикам базовых текстурных признаков: *a* – с разными углами смежности  $\alpha$  и расстоянием смежности  $d = 1$ ; *b* – при угле  $\alpha = 0$  и разных расстояниях  $d$ . Текстурные признаки вычислялись по объектам сбалансированной обучающей выборки

Fig. 3. Absolute Spearman correlation matrix derived from the statistics of the basic texture features: *a* – with different angles  $\alpha$  and distance  $d = 1$ ; *b* – with the angle of adjacency  $\alpha = 0$  and different adjacency distances  $d$ . The texture features were calculated for the objects of the balanced training set

Варианты наборов спектральных данных в соответствии с табл. 1: мультиспектральные изображения Landsat 8, мультиспектральные изображения Sentinel 2, мультиспектральные изображения WorldView 2.

Итого в рамках численного эксперимента тестируются 18 моделей.

Для каждого метода классификации путем полного перебора производится отбор признаков по точности на отдельной тестовой выборке: спектральных – для моделей, использующих только спектральные признаки, а также спектральных и текстурных – для моделей, использующих оба вида признаков. Метод полного перебора предполагает выбор набора признаков из всех возможных комбинаций по точности предсказания на тестовой выборке. Результаты представлены в табл. 2. Эти наборы данных не являются единственно верными и могут отличаться при существенных изменениях тестовых выборок.

Таблица 2

## Признаки, отобранные для каждой тестируемой модели

Метод классификации	Спутник	Признаки	Отобранные признаки
RF	Landsat 8	Спектральные	SWIR-1, SWIR-2
		Спектральные и текстурные	SWIR-1, SWIR-2, автокорреляция, асимметрия, контраст, корреляция ( $\alpha = 0^\circ$ )
	Sentinel 2	Спектральные	Green, SWIR-1, SWIR-2
		Спектральные и текстурные	Green, SWIR-1, SWIR-2, автокорреляция, асимметрия, контраст, корреляция ( $\alpha = 0^\circ$ ), корреляция ( $\alpha = 135^\circ$ )
	Worldview 2	Спектральные	Blue, Green, Red, NIR-1, NIR-2
		Спектральные и текстурные	Blue, Green, Red, NIR-1, NIR-2, автокорреляция, контраст, асимметрия, корреляция ( $\alpha = 0^\circ$ ), корреляция ( $\alpha = 135^\circ$ )
kNN	Landsat 8	Спектральные	SWIR-1, SWIR-2
		Спектральные и текстурные	SWIR-1, SWIR-2, автокорреляция, асимметрия
	Sentinel 2	Спектральные	Blue, SWIR-1, SWIR-2
		Спектральные и текстурные	Blue, SWIR-1, SWIR-2, асимметрия, контраст
	Worldview 2	Спектральные	Blue, Green, Red, NIR-1, NIR-2
		Спектральные и текстурные	Blue, Green, Red, NIR-1, NIR-2, автокорреляция, контраст, асимметрия, корреляция ( $\alpha = 135^\circ$ )
QDA	Landsat 8	Спектральные	Green, Red, SWIR-1, SWIR-2
		Спектральные и текстурные	Green, Red, SWIR-1, SWIR-2, автокорреляция, контраст, корреляция ( $\alpha = 0^\circ$ ), корреляция ( $\alpha = 135^\circ$ )
	Sentinel 2	Спектральные	Red, SWIR-1, SWIR-2
		Спектральные и текстурные	Red, SWIR-1, SWIR-2, автокорреляция – 0,0, контраст, корреляция ( $\alpha = 0^\circ$ )
	Worldview 2	Спектральные	Green, Red, NIR-1, NIR-2
		Спектральные и текстурные	Green, Red, NIR-1, NIR-2, автокорреляция, контраст

Порядок численного эксперимента, применимый для каждой модели из табл. 2, следующий. На первом этапе происходит обучение выбранного классификатора по группированному набору спектральных или спектрально-текстурных признаков. Далее проводится попиксельная классификация. Для каждого таксационного выдела определяется преобладание в его границах пикселей, классифицированных как лиственный или хвойный лес, т. е. выявляется доминантный класс. Если в контур выдела не попадает ни один пиксель, определенный как лиственный или хвойный лес, считается, что доминантный класс в этом выделе отсутствует, а если в границы выдела не попадает центр ни одного пикселя, то – что доминантный класс определить не удастся. Также для каждого выдела устанавливается субдоминантный класс – второй класс по количеству пикселей в контуре выдела из классов «лиственный лес» или «хвойный лес». Если в границах контура нет пикселей недоминантного класса, то субдоминантный класс для данного выдела отсутствует.

Точности моделей определяются долей выделов, для которых доминантный (или субдоминантный) класс вычислен верно, исключая выделы, в которых нет доминантного (или субдоминантного) класса, и выделы, для которых доминантный (или субдоминантный) класс не был определен. Результаты тестирования моделей, в том числе точности построения тематических карт доминантных и субдоминантных отделов, а также усредненная точность распознавания всего рассматриваемого спектра объектов, устанавливаемая методом 10-блочной кросс-валидации, сведены в табл. 3.

Метод 10-блочной кросс-валидации показывает, что увеличение точности при переходе от спектральной к спектрально-текстурной классификации существенно превосходит различие точности рассматриваемых методов.

Дополнительно мы провели визуальный анализ качества результатов попиксельной спектрально-текстурной классификации изображения всей обследуемой территории. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты классификации методом kNN, полученные на основе мультиспектральных изображений Landsat 8, Sentinel 2 и WorldView 2, а также текстурное изображение высокого разрешения для сравнения. Видно, что при использовании данных Landsat 8, имеющих наиболее низкое пространственное разрешение, в большей степени нарушается геометрическая структура восстанавливаемых объектов, в особенности это касается зон застройки. Данные тематической обработки изображений WorldView 2 имеют наименьшее количество артефактов.

Сделанные выводы согласуются с результатами кросс-валидации, которые представлены в табл. 3 для метода kNN. Спектрально-текстурная классификация изображений Landsat 8 и Sentinel 2 имеет значимо более низкую точность по сравнению с классификацией изображений WorldView 2. Данный эффект отсутствует при использовании метода QDA. Часть артефактов, возникающих при обработке данных Sentinel 2 и WorldView 2, объясняется наличием дорожной сети, которая в большинстве случаев дешифрования может быть классифицирована как зона застройки.

Таблица 3

## Результаты классификации наборов данных разными методами

Метод	Спутник	Признаки	Точность		
			по домини- нантам	по субдоми- нантам	по кросс- валидации
RF	Landsat 8	Спектральные	0,834	0,709	0,732
		Спектральные и текстурные	0,853	0,762	0,852
	Sentinel 2	Спектральные	0,861	0,763	0,788
		Спектральные и текстурные	0,836	0,719	0,930
	WorldView 2	Спектральные	0,852	0,767	0,624
		Спектральные и текстурные	0,857	0,770	0,924
kNN	Landsat 8	Спектральные	0,840	0,708	0,774
		Спектральные и текстурные	0,842	0,728	0,777
	Sentinel 2	Спектральные	0,867	0,767	0,793
		Спектральные и текстурные	0,851	0,741	0,794
	WorldView 2	Спектральные	0,876	0,793	0,666
		Спектральные и текстурные	0,882	0,815	0,928
QDA	Landsat 8	Спектральные	0,835	0,708	0,778
		Спектральные и текстурные	0,847	0,744	0,890
	Sentinel 2	Спектральные	0,880	0,801	0,800
		Спектральные и текстурные	0,872	0,777	0,859
	WorldView 2	Спектральные	0,885	0,800	0,602
		Спектральные и текстурные	0,865	0,781	0,875

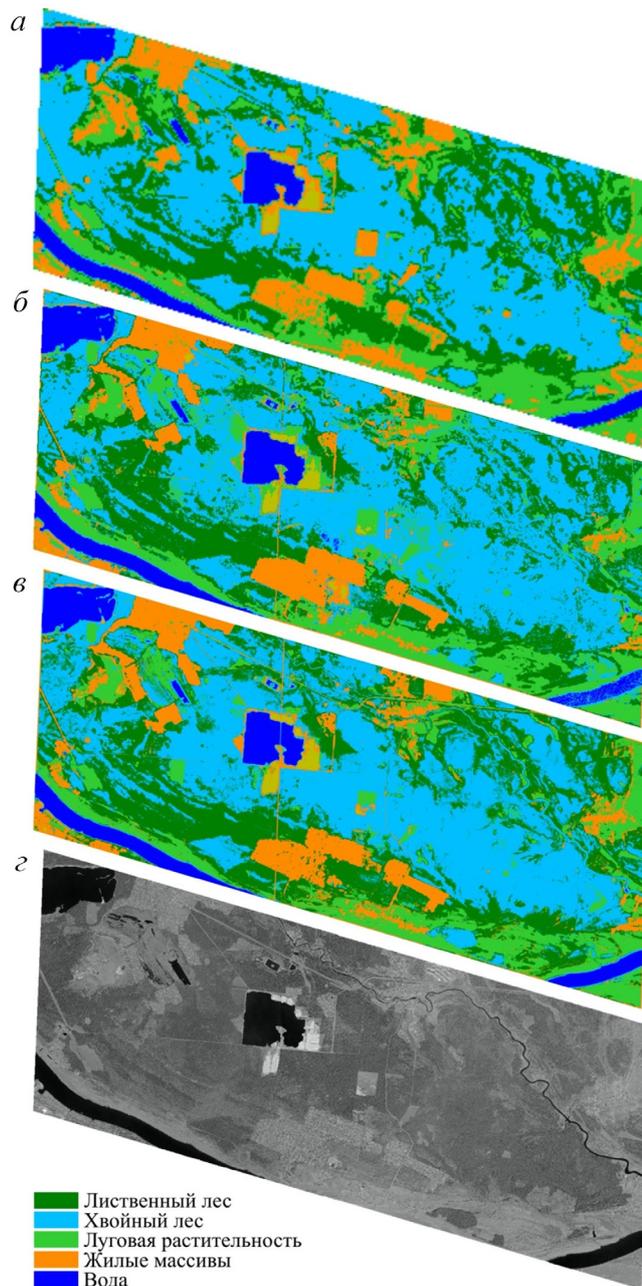


Рис. 4. Изображения, полученные в результате попиксельной классификации методом kNN по спектральным и текстурным признакам, сделанные на основе мультиспектральных изображений Landsat 8 (а), Sentinel 2 (б) и WorldView 2 (в), и панхроматическое изображение высокого разрешения (г)

Fig. 4. Results of pixel-by-pixel classification by kNN algorithm with the use of both spectral and texture features extracted from multispectral images of Landsat 8 (a), Sentinel 2 (б) and WorldView 2 (в), and a high-resolution panchromatic image (г)

На рис. 5 показаны доминантные классы в контурах выделов. Тематические карты были построены по результатам спектрально-текстурной классификации методом kNN мультиспектральных изображений, полученных со спутников Landsat 8, Sentinel 2, WorldView 2, а также по данным наземной лесной таксации. Контуры выделов на рисунке залиты цветами, обозначающими доминантные классы. Аналогичным образом показаны тематические карты субдоминантных отделов (рис. 6). Следует отметить, что спутниковые тематические карты, в особенности построенные с использованием изображений Sentinel 2 и WorldView 2, имеют большую схожесть.

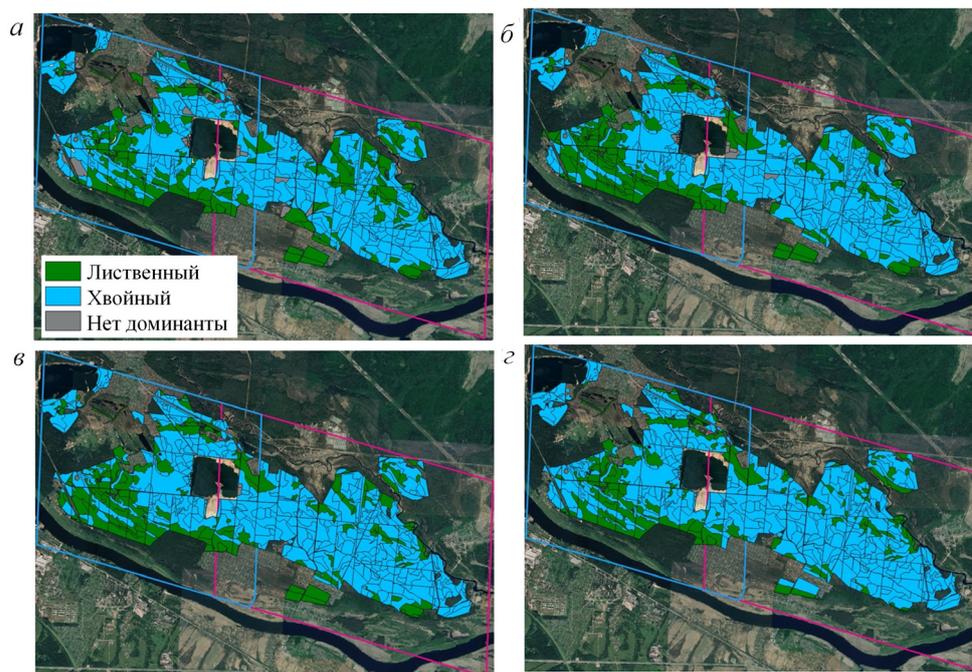


Рис. 5. Доминантные классы в контурах выделов лесной таксации Савватъевского лесничества, определенные по классификации методом kNN по спектральным и текстурным признакам, сделанные на основе мультиспектральных изображений Landsat 8 (а), Sentinel 2 (б), WorldView 2 (в), а также по наземным данным лесной таксации (г). Синяя и фиолетовая рамки – контуры используемых изображений WorldView 2

Fig. 5. Dominant classes within the boundaries of forest inventory plots of Savvat'yevo forestry calculated from classification by kNN algorithm with the use of spectral and texture features extracted from multispectral images of Landsat 8 (a), Sentinel 2 (б), WorldView 2 (в), as well as obtained from ground-based forest inventory data (г). Blue and purple frames are bounding boxes of the WorldView 2 images used

Согласно табл. 3 точность определения доминантных пород выделов Савватъевского лесничества с помощью всех рассматриваемых моделей составляет приблизительно 83...89 %. При этом нет выраженной разницы между результатами моделей, использующих только спектральные признаки при классификации и спектральные совместно с текстурными. Добавление текстурных признаков, как видно из таблицы, увеличивает качество кросс-валидации на обучающей выборке, особенно в случаях с моделями, использующими мультиспектральные фотографии WorldView 2. Это связано с тем, что применение текстурных признаков позволяет яснее отличать луговую растительность и другие типы

подстилающей поверхности от лесной, но при распознавании лиственной и хвойной растительности ключевыми являются именно спектральные признаки.

Также по табл. 3 можно проследить зависимость точности определения доминантных классов от использованных мультиспектральных снимков, которые, в свою очередь, отличаются друг от друга ПР. Точность моделей на основе изображений Landsat 8 с ПР 30 м меньше, чем точность моделей изображений Sentinel 2 с ПР 10 м, в среднем на 2 %. При этом модели, работающие с изображением Sentinel 2, показали точности определения доминантных классов хуже на < 1 % по сравнению с моделями, работающими с изображением WorldView 2 (ПР ≈ 2 м). Метод RF дает наименьшую точность определения доминантных классов, а kNN и QDA отличаются незначительно.

Точность классификации по доминантам не превышает 89 %. Вероятно, это связано не только с ошибками моделей классификации, но и с устареванием данных наземной лесной таксации, ошибками в них. Некоторые модели, как показано на рис. 5, определяют, что для части выделов доминанты нет, т. е. в этих выделах леса нет вообще (хотя по данным лесной таксации он должен быть), и такие выделы повторяются в результатах классификации разными методами. Выделов без леса 17. Тщательное рассмотрение позволяет установить выделы, которые могут давать ошибку при классификации: в 11 выделах лес занимает менее 60 % площади, в 7 – полнота очень низкая, в 27 – были посажены лесные культуры, в 26 – предположительно смешанный лес, поэтому точное определение класса таких выделов затруднено.

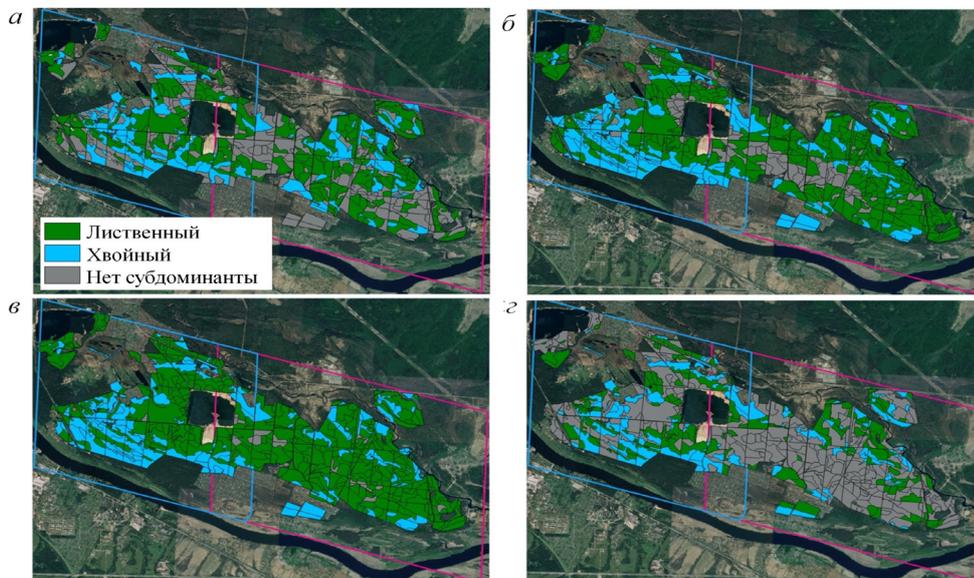


Рис. 6. Субдоминантные классы в контурах выделов лесной таксации Савват'евского лесничества, определенные по классификации методом kNN по спектральным и текстурным признакам, сделанные на основе мультиспектральных изображений Landsat 8 (а), Sentinel 2 (б), WorldView 2 (в), а также по наземным данным лесной таксации (г). Синяя и фиолетовая рамки – контуры используемых изображений WorldView 2

Fig. 6. Subdominant classes within the boundaries of the inventory plots of Savvat'yevo forestry calculated from by classification by kNN algorithm with the use of spectral and textural features extracted from multispectral images of Landsat 8 (a), Sentinel 2 (б), WorldView 2 (в), as well as obtained from ground-based forest inventory data (г). Blue and purple frames are bounding boxes of the WorldView 2 images used

Согласно рис. 6, модели классификации, работающие с данными меньшего пространственного разрешения, определяют большее количество выделов как выделы без субдоминантной породы, что во многих случаях соотносится с данными наземных исследований. Это связано с тем, что попиксельная классификация по данным высокого разрешения с большей вероятностью определит хотя бы один пиксель из выдела как другую породу, которой там быть не должно. Такая проблема решается введением порога доли площади выдела, его необходимо преодолеть, тогда порода будет признана субдоминантной для данного выдела.

### *Заключение*

Предложенный метод тематической обработки с использованием мультиспектральных изображений среднего и высокого пространственного разрешения совместно с данными текстурного анализа панхроматических изображений сверхвысокого разрешения позволяет – по сравнению с традиционной тематической обработкой с использованием только спектральных признаков – повысить точность сегментации лесных территорий на фоне различных природных и антропогенных объектов, а также классифицировать хвойные и лиственные леса. В целом улучшение точности тематической обработки, оцениваемой методом кросс-валидации, характерно для всех рассмотренных алгоритмов классификации. Наиболее значимое оно при использовании ансамблевого алгоритма классификации RF (случайный лес), наименьшее увеличение точности соответствует методу квадратичного дискриминантного анализа. Применение традиционного подхода к обработке мультиспектральных изображений WorldView 2 снижает точность классификации вследствие увеличения пространственных вариаций спектральных сигнатур между освещенными и затененными участками лесного полога. Однако при добавлении текстурной информации точность существенно повышается и превосходит соответствующие точности тематической обработки изображений среднего пространственного разрешения. Сравнение тематических карт доминантных и субдоминантных отделов лесной растительности, построенных по данным спектрально-текстурной обработки, с наземной информацией не позволяет выявить значимого эффекта как от привлечения текстурных признаков, так и от использования ансамблевого подхода: разброс по точности составляет не более 5 % около среднего значения 85 %. Анализ изображений выделов, дающих ошибку, показывает, что основной причиной несоответствий являются специфические погрешности данных наземной лесной таксации, и говорит о необходимости их актуализации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Воронина П.В., Мамаш Е.А.* Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 76–102. Voronina P.V., Mamash E.A. Classification of Thematic Monitoring for Agriculture Problems Using Remote Sensing MODIS Data. *Vychislitelnye tekhnologii* [Computational Technologies], 2014, vol. 19, no. 3, pp. 76–102.
2. *Колодникова Н.В.* Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов // Докл. ТУСУР. 2004. № 1(9). С. 113–124. Kolodnikova N.V. Overview of Textural

Features for Pattern Recognition Problems. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2004, no. 1(9), pp. 113–124.

3. *Потанов А.А.* Новые информационные технологии на основе вероятностных текстурных и фрактальных признаков в радиолокационном обнаружении малоконтрастных целей // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48, № 9. С. 1101–1119. Potanov A.A. New Information Technology in Radar Detection of Low-Contrast Targets Based on Probabilistic Texture and Fractal Features. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2003, vol. 48, no. 9, pp. 1101–1119.

4. *Фраленко В.П.* Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли // *Программные системы: теория и приложения*. 2014. Т. 5, № 4(22). С. 19–39. Fralenko V.P. Methods of Image Texture Analysis, Earth Remote Sensing Data Processing. *Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Program Systems: Theory and Applications], 2014, no. 4(22), pp. 19–39.

5. *Шабанов Н.В., Барталев С.А., Ерошенко Д.А., Плотников Ф.В.* Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 4. С. 166–178. Shabanov N.V., Bartalev S.A., Eroshenko F.V., Plotnikov D.E. Development of Capabilities for Remote Sensing Estimate of Leaf Area Index from MODIS Data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2018, vol. 15, no. 4, pp. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178>

6. Beguet B., Guyon D., Boukir S., Chehata N. Automated Retrieval of Forest Structure Variables Based on Multi-Scale Texture Analysis of VHR Satellite Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, vol. 96, pp. 164–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.008>

7. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, iss. 1, pp. 5–32. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

8. Brynolfsson P., Nilsson D., Torheim T., Asklund T., Thellenberg Karlsson C., Trygg J., Nyholm T., Garpebring A. Haralick Texture Features from Apparent Diffusion Coefficient (ADC) MRI Images Depend on Imaging and Pre-Processing Parameters. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. 4041. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04151-4>

9. Chen J.M., Cihlar J. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 55, iss. 2, pp. 153–162. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00195-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00195-6)

10. Cover T.M., Hart P.E. Nearest Neighbor Pattern Classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967, vol. 13, no. 1, pp. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>

11. Dmitriev E.V., Sokolov A.A., Kozoderov V.V., Delbarre H., Melnik P.G., Donskoi S.A. Spectral Texture Classification of High-Resolution Satellite Images for the State Forest Inventory in Russia. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*, 2019, vol. 11149, art. 111491J. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2532965>

12. Eklundh L., Harrie L., Kuusk A. Investigating Relationships between Landsat ETM+ Sensor Data and Leaf Area Index in a Boreal Conifer Forest. *Remote Sensing of Environment*, 2001, vol. 78, iss. 3, pp. 239–251. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00222-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00222-X)

13. Ferreira M.P., Wagner F.H., Aragão L.E.O.C., Shimabukuro Y.E., de Souza Filho C.R. Tree Species Classification in Tropical Forests Using Visible to Shortwave Infrared WorldView-3 Images and Texture Analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, vol. 149, pp. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.019>

14. Franklin S.E. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. Boca Raton, FL, CRC press, 2001, p. 424. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420032857>

15. Goldberger J., Hinton G.E., Roweis S., Salakhutdinov R.R. Neighbourhood Components Analysis. *Advances in Neural Information Processing Systems 17: Proceedings of the 2004 Conference*. Ed. by L. Saul, Y. Weiss, L. Bottou. Cambridge, MA, MIT Press, 2004, pp. 513–520.
16. Hadi H., Korhonen L., Hovi A., Rönholm P., Rautiainen M. The Accuracy of Large-Area Forest Canopy Cover Estimation Using Landsat in Boreal Region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, vol. 53, pp. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.08.009>
17. Haralick R.M. Statistical and Structural Approaches to Texture. *Proceedings of the IEEE*, 1979, vol. 67, no. 5, pp. 786–804. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>
18. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, vol. SMC-3, no. 6, pp. 610–621. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
19. Lechner A.M., Foody G.M., Boyd D.S. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth*, 2020, vol. 2, iss. 5, pp. 405–412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>
20. Paletto A., Tosi V. Forest Canopy Cover and Canopy Closure: Comparison of Assessment Techniques. *European Journal of Forest Research*, 2009, vol. 128, iss. 3, pp. 265–272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0262-x>
21. Sexton J.O., Song X.-P., Feng M., Noojipady P., Anand A., Huang C., Kim D.-H., Collins K.M., Channan S., DiMiceli C., Townshend J.R. Global, 30-m Resolution Continuous Fields of Tree Cover: Landsat-Based Rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with Lidar-Based Estimates of Error. *International Journal of Digital Earth*, 2013, vol. 6, iss. 5, pp. 427–448. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.786146>
22. Srivastava S., Gupta M.R., Frigyik B.A. Bayesian Quadratic Discriminant Analysis. *Journal of Machine Learning Research*, 2007, vol. 8, pp. 1277–1305.
23. Tharwat A. Linear vs. Quadratic Discriminant Analysis Classifier: A Tutorial. *International Journal of Applied Pattern Recognition*, 2016, vol. 3, no. 2, pp. 145–180. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJAPR.2016.079050>

УДК 630\*284.2:630\*385.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-105-117

## ДИНАМИКА ВЫДЕЛЕНИЯ СОСНОВОГО ТЕРПЕНТИНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАКРОСТРУКТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДРЕВЕСИНЫ НА БОЛОТНЫХ ПОЧВАХ

*А.С. Новосёлов, канд. с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [H-1173-2019](#),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>*

*Вологодский государственный университет, ул. Ленина, д. 15, г. Вологда, Россия,  
160000; e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru*

---

*Оригинальная статья / Поступила в редакцию 08.04.20 / Принята к печати 17.08.20*

---

**Аннотация.** Прогнозирование получения лесохимических продуктов из пасоки сосны (терпентина), произрастающей на торфяных почвах, по данным радиального прироста за последние годы (текущий прирост) актуально в настоящее время. Натуральный сосновый терпентин превосходит по многим параметрам аналогичное сырье, получаемое на лесохимических производствах путем экстракции. В опыт по установлению специфики связи выделения соснового терпентина с макроструктурой древесины были вовлечены контрольный (естественно-заболоченный), искусственно-дренируемый (с помощью самотечных каналов), а также осушаемый и антропогенно-нарушенный несплошной заготовкой (2005 г.) древостой. Исследование проведено в Сокольском муниципальном районе Вологодской области (Сокольское участковое лесничество). Древостой в эксперименте представлен высоко- и среднеполнотными категориями с доминированием сосны. Запас стволовой массы сосны в осушенных условиях достигает 500 м<sup>3</sup>/га. Экспресс-метод нанесения микроранений позволил в кратчайшие сроки, за 2013–2015 гг. (в течение трех месяцев летней части периода вегетации), установить динамику смолы выделения у сосен. Через сутки после фиксации трубок в корке дерева замеряли потек терпентина (индивидуальный и среднестатистический учет). Отбор образцов древесины в радиальном сечении проводили в 2019 г. возрастным буровом (выявлены приросты поздней и ранней древесины, ширина годичного кольца и доля поздней древесины в годичных слоях). Выполнены статистические анализы результатов: вариационный, корреляционный и регрессионный, а также использованы критерии Стьюдента и Фишера. Подтверждено положительное влияние гидролесомелиорации на выделение терпентина при подсочке сосны. Прогнозировать смолы выделение по данным радиальных приростов деревьев представляется возможным (с вероятностью ошибки в 43 %) в сосняке на торфяных почвах после искусственного дренажа. В естественно-заболоченных условиях за время проведения эксперимента спрогнозировать тенденции смолы выделения по радиальному приросту древесины не удалось.

**Для цитирования:** Новосёлов А.С. Динамика выделения соснового терпентина в зависимости от макроструктурных показателей древесины на болотных почвах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 105–117. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-105-117

**Ключевые слова:** подсочка сосны, гидротехническая мелиорация, выборочная заготовка древесины, факторы среды, макроструктура древесины, радиальный прирост, сосновый терпентин.

**DYNAMICS OF PINE TURPENTINE FLOW DEPENDING ON THE MACROSTRUCTURAL PARAMETERS OF WOOD ON SWAMPED SOILS**

*Anatoly S. Novoselov*, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [H-1173-2019](https://orcid.org/0000-0002-6907-0424),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6907-0424>

Vologda State University, ul. Lenina, 15, Vologda, 160000, Russian Federation;

e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru

---

**Original article** / Received on April 8, 2020 / Accepted on August 17, 2020

---

**Abstract.** Issues related to predicting the production of wood chemical products of sap (turpentine) of pine growing on peat soils, according to the data of radial growth in recent years (current growth), are quite relevant nowadays. It is well known that natural pine turpentine is superior in many respects to similar raw materials obtained in wood chemical industry by extraction. The experiment aimed at determining the specific relationship between the flow of pine turpentine and the wood macrostructure involved the following types of stands: control (naturally swamped), artificially drained (using gravity canals), as well as drained and anthropogenically disturbed by partial harvesting (in 2005). The study was carried out in the Sokol municipal district of the Vologda region (Sokol area forestry). The stands in the experiment are represented by high and medium density categories and dominated by pine. The stock of pine stem mass in drained conditions reaches 500 m<sup>3</sup>/ha. The express method of micro-wounding made it possible to determine the dynamics of resin flow in the shortest possible time, for 2013–2015 (during three months of the summer part of the growing season). A day after fixing the tubes in the tree bark, the turpentine flow was measured (individual and statistically average recording). Wood sampling in the radial section was carried out in 2019 by an increment borer; the increment of late and early wood, the width of the annual ring and the proportion of late wood in the annual layers were found. Statistical analyses of the obtained results were carried out: variation, correlation and regression. Student's and Fisher's tests were used as well. The positive effect of hydro-forest reclamation on the flow of turpentine during pine tapping was confirmed. It is possible to predict resin flow with an error probability of 43 % based on radial growth data in a pine forest on peat soils after artificial drainage. During the experiment in naturally swamped conditions it was not possible to predict trends in resin flow by radial growth of wood.

**For citation:** Novoselov A.S. Dynamics of Pine Turpentine Flow Depending on the Macrostructural Parameters of Wood on Swamped Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 105–117. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-105-117

**Keywords:** tapping of pine, hydrotechnical reclamation, selective harvesting of wood, environmental factors, macrostructure of wood, radial growth, pine turpentine.

### *Введение*

Развитие лесоводства требует исследований формирования лесных экосистем в динамическом аспекте. В качестве приоритета выступает установление роли экологических факторов, обуславливающих энергию роста и развития лесных экосистем. В научной литературе есть достаточно сведений об особенностях влияния экологических условий на рост древостоев минеральных почв, но проблема специфики роста леса на торфяных почвах (в особенности после проведения гидротехнической мелиорации и несплошной заготовки древесины) остается до конца не изученной [2, 8].

Терпеноиды, продуцируемые хвойными деревьями, обладают биологической активностью широкого спектра [3, 4, 12]. Радиальный прирост до и после лесосушения выступает в качестве сравнительного показателя при определении целесообразности проведения мероприятий по осушению и критерия необходимости реконструкций мелиоративной сети каналов и уходов за ней [1, 14, 18, 19]. Вопросы связи выделения соснового терпентина и радиального прироста сосняков в антропогенно-нарушенных условиях среды актуальны, однако за последние два десятилетия публикации на данную тему в научной литературе встречаются редко. Камбиальный слой создает смоляные ходы продольного и радиального направления (а также патологические), поэтому важно найти способ прогнозирования смолопродуктивности по параметрам радиального прироста за последние несколько лет роста деревьев [12].

Спрос на терпентин, ценное лесохимическое сырье, возрастает [11]. Его источником – в то время как древостои, которые имеют долю сосны в составе от шести единиц и более, рассредоточены после непрерывной эксплуатации лесных массивов, процент участия сосны в сухостойных лесах непрерывно сокращается, ее запасы в осушаемых условиях плохо осваиваются из-за значительной отдаленности объектов [10, 16, 17, 20] – могут стать объекты гидролесомелиорации [5, 7, 11, 15].

Цель исследования – изучить особенности взаимосвязи смоловыделения при опытной подпочке (экспресс-метод микроранений) и макроструктурных показателей строения древесины в высоко- и среднеполнотных сосновых древостоях на болотных почвах.

#### *Объекты и методы исследования*

Опытные сосняки (табл. 1) Сокольского района Вологодской области представлены древостоями в осушаемых условиях (пробные площади (ПП) 8 и 9), а также на двух пасаках осушаемых сосняков после проведения выборочной заготовки древесины (ПП 53–54 в приканальном положении и ПП 55–56 в центре межканального пространства; ПП 45–46 – приканальное положение и ПП 47–48 на межканальном пространстве). В сосняке после выборочной заготовки древесины часть территории относится к краю пасаек (ПП 45, 47, 53, 55) и часть – к середине (центру) оставленных на доращивание лесополос (ПП 46, 48, 54, 56). Опытные выборочные заготовки древесины были спроектированы в 2005 г. сотрудниками Вологодского отделения Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства. Пасаки расположены под углом в 45° к осушительному каналу и магистральному волоку.

В качестве контроля использовали неосушенный сосновый древостой на болоте переходного типа в Рабангско-Доровском болотном массиве и осушаемый сосняк (ПП 8 и 9 при сравнении с объектом выборочной лесозаготовки). Подобранные древостои являются высокополнотными (кроме контрольного) с большой долей сосны в составе.

Таблица 1

## Лесоводственно-гаксационное описание опытных лесных объектов

ПП	Положение	Типа леса	Возраст, лет	Бонитет	Состав древостоя	Средние показатели							Запас, м <sup>3</sup> /га	
						Высота, м	Диаметр, см	Густота, экз./га	Полнота		Порода	Сыро-растущий	Сухо-стойный	
									Абсолютная, м <sup>3</sup> /га	Относительная				
17	К	Сосняк кустарничково-сфагновый	116	III	10С+Б	22	19	1020	13,7	0,4	С	143,2	14	
						16	14	–	–	–	Б	–	–	
53–56	ВЗД	Сосняк черничный, осушаемый	70	I	7С2Е1Б	22	21	400	14,2	0,4	С	148,3	13	
						12	15	380	7,1	0,3	Е	45,6	–	
						15	11	200	1,9	0,1	Б	13,7	–	
45–48	ВЗД	Сосняк черничный, осушаемый	72	I	9С1Е+Б, ед. Ос	23	21	740	28,0	0,7	С	303,1	8	
						14	13	280	3,9	0,1	Е	28,6	–	
						15	10	–	–	–	Б	–	–	
8	ПК	Сосняк черничный, осушаемый	117	IV	10С, ед. Б	20	22	1360	55,7	1,5	С	535,8	–	
						12	10	–	–	–	Б	–	–	
9	МК	Сосняк черничный, осушаемый	120	IV	10С, ед. Б	21	23	1260	56,5	1,5	С	566,8	–	
						10	9	–	–	–	Б	–	–	

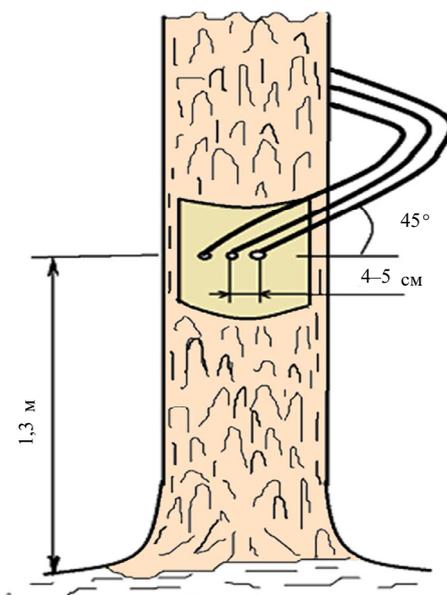
Примечание: К – контроль; ВЗД – выборочная заготовка древесины; ПК и МК – приканальное и межканальное (центральное) положение ПП соответственно.

В ходе исследования применялся метод натуральных наблюдений за древостоями: по общепринятым в лесной таксации и лесоводстве методикам через определение площадей поперечных сечений деревьев на высоте груди устанавливались таксационные показатели (породный состав, запас древесины, абсолютная и относительная полноты, средние высоты и таксационные диаметры). ПП в осушаемых условиях ограничивались длинной стороной вдоль каналов [7], а на объекте выборочной заготовки древесины в оставленных на доращивание полосах древостоя находились в центре осушаемой полосы и рядом с каналом. При таксационных расчетах использовались справочные материалы для Северо-Запада России [13].

Опытная подсочка (на каждой пробной площади подбирались от 15 здоровых сосновых деревьев) сосен проводилась с помощью экспресс-метода микропоранений [6]. Он заключался в высверливании на обнаженных подрумяненных (рис. 1) участках стволов закрытых поранений ( $\varnothing$  5 мм, глубина – 15 мм) с последующей установкой в них под углом  $45^\circ$  прозрачных поливинилхлоридных (ПВХ) трубок [11] (длинной 100–150 см), верхние концы которых иглами прикреплялись к коре деревьев.

Рис. 1. Схема постановки трубок ПВХ для оценки смолопродуктивности

Fig. 1. PVC tubes layout for assessment of resin productivity



В год проведения опыта в сосняках (2019) на мезотрофных торфяных залежах индивидуально для каждого дерева определялись выделение терпентина и прирост слоев трахеид. Длины потока терпентина измерялись с интервалом в одни сутки. Для большинства объектов опыт проводился однократно в середине каждого из трех месяцев летнего периода (три года наблюдений – в осушаемых и пройденных выборочной заготовкой сосняках, пять лет – только в осушаемых сосновых древостоях). Исключение составил заболоченный сосняк (из-за своей значительной удаленности от объектов инфраструктуры), где выделение терпентина на протяжении трех лет эксперимента учитывалось только в июле. По полученным материалам сформирована подробная база данных.

Для измерения радиальных приростов сосновых деревьев были отобраны на высоте 0,6 м при помощи 30-сантиметрового возрастного бура шведского производства керны древесины в количестве не менее 10 экз./ПП (для получения точности опыта в 10 %). Керны зачищались лезвием и покрывались тонким слоем мела в целях более точного считывания параметров годовых колец. Для измерения радиального прироста использовались сканер и графический редактор «PaintDotNet» (подготовлена шкала замеров приростов с ценой деления в 0,05 мм). По полученным данным строились графики динамики радиального прироста сосновых деревьев. К показателям макроструктуры относились: ширина годичного кольца, поздняя и ранняя древесина [9].

### Результаты исследования и их обсуждение

Выделение терпентина у деревьев, произрастающих в заболоченных условиях, происходит низкими темпами (табл. 2). Содержание поздних трахеид древесины в годичных кольцах здесь не превышает 38 % (в среднем – 37 %).

Таблица 2

#### Выделение терпентина и макроструктура древесины в естественно-заболоченных условиях (месяц наблюдений – июль)

Год эксперимента	Средние показатели				
	Потеки живицы, см (M±m <sub>M</sub> )	ПД, мм (M±m <sub>M</sub> )	РД, мм (M±m <sub>M</sub> )	ШГК, мм (M±m <sub>M</sub> )	Доля ПД от ШГК, %
2013	29,98±4,72	0,17±0,04	0,28±0,03	0,45±0,07	37,78
2014	26,66±9,5	0,19±0,03	0,34±0,04	0,53±0,07	35,24
2015	<b>42,36±9,47</b>	<b>0,21±0,04</b>	<b>0,36±0,04</b>	<b>0,57±0,08</b>	<b>36,84</b>
Среднее за три года	33,00±7,90	0,19±0,04	0,33±0,04	0,52±0,07	36,62

Примечание: ПД и РД – поздняя и ранняя древесина соответственно; ШГК – ширина годичного кольца. Жирным шрифтом отмечены максимумы параметров.

Различия в выделении терпентина (в июле каждого из трех лет и среднее за период наблюдений) между контролем и осушаемыми древостоями выглядят следующим образом. В осушаемых сосняках в приканальном положении различие в потеке, приросте поздней и ранней древесины, ширине годичного кольца, содержании поздней древесины в годичном слое составляет 53, 39 и 23, 30, 12 % соответственно. Показатели сосняков, занимающих межканальное положение, также выше, чем показатели контрольного древостоя, кроме величины ранних трахеид в годичном кольце – различие не установлено. Причем следует выделить содержание поздней древесины в годичном кольце – различие здесь выше остальных случаев и равняется 22 %. С величиной потека различие составило 10 %.

Сравнение потеков у заболоченного и искусственно-дренируемого после выборочной заготовки древесины сосняков в целом на межканальном пространстве выявило следующие отличия: в потеке – 46 %, в приросте поздней древесины – 68 %, ранней – 56 %, в ширине годичного кольца – 62 %, в содержании поздней древесины в годичном слое – 17 %. Отличия заболоченного сосняка и сосняка, занимающего приканальное положение, во многом совпадают. Отдельно следует указать на отличие в выделении терпентина – здесь оно составляет 37 %.

При рассмотрении деревьев по краям и в центре пасек (полос древостоя, оставленных на доращивание) установлено, что в целом отличия двух параметров – потока и прироста поздней древесины – схожи между собой: 42 и 67 % соответственно.

Различия (в процентах) деревьев контроля и деревьев, расположенных в разных частях пасеки, наблюдаются в: приросте ранней древесины (центр пасеки – 50; край – 58), ширине годичного кольца (центр – 58; край – 63), содержании поздней древесины в годичном слое (центр – 20; край – 15). Сравнение параметров деревьев на участке, где были проведены лесозаготовки, и на болотном массиве выявило наибольшие положительные отличия для потока терпентина (край пасеки и межканальное положение), прироста поздней (небольшое увеличение у деревьев с края пасеки) и ранней (межканальное положение и край пасеки) древесины, ширины годичного кольца (аналогично предыдущему параметру) и содержания поздней древесины в годичном кольце (приканальное положение и центр пасеки).

В отдельные годы у сосновых деревьев на болоте обнаружена корреляция (табл. 3) выделения терпентина и прироста трахеид от средней до высокой (особенно в 2014 г. – с приростами поздней древесины и в 2015 г. – с приростами ранней). За три года наблюдений в целом зависимость между данными параметрами установить не удалось.

Таблица 3

**Связь выделения терпентина с макроструктурой древесины  
(контроль – заболоченный сосняк)**

Год эксперимента	Параметр макроструктуры	Коэффициент корреляции (r) и его достоверность (t <sub>r</sub> ) за июль	
		r	t <sub>r</sub>
2013	ПД	-0,26	-1,24
	РД	<b>-0,32</b>	<b>-1,60</b>
	ШГК	-0,30	-1,50
2014	ПД	<b>0,63</b>	<b>4,85</b>
	РД	<b>0,61</b>	<b>4,36</b>
	ШГК	<b>0,63</b>	<b>4,50</b>
2015	ПД	-0,06	-0,27
	РД	<b>-0,52</b>	<b>-3,25</b>
	ШГК	<b>0,33</b>	<b>-1,65</b>
Среднее за три года	ПД	0,10	1,11
	РД	-0,08	-0,16
	ШГК	0,00	0,45

Примечание: Жирным шрифтом (здесь и в табл. 6, 7) обозначены коэффициенты (r и t<sub>r</sub>) выше 0,3 (по модулю).

У осушаемых древостоев (табл. 4), занимающих приканальное положение, большее количество пасеки выделяется в июле, у деревьев, произрастающих в межканальном положении, – в июне. Прирост выше у сосен в приканальном положении. Тем не менее содержание поздней древесины в годичных кольцах практи-

чески на 6 % превосходит этот показатель у деревьев в центре осушаемой полосы. У контрольных заболоченных сосняков доля поздней древесины почти на 10 % ниже, чем у осушаемых древостоев.

Таблица 4

**Выделение терпентина и макроструктура древесины  
в осушаемых условиях, среднее за пять лет наблюдений**

ПП	Месяц наблюдений	Средние показатели				
		Потеки живицы, см ( $M \pm m_M$ )	ПД, мм ( $M \pm m_M$ )	РД, мм ( $M \pm m_M$ )	ШГК, мм ( $M \pm m_M$ )	Доля ПД от ШГК, %
8	Июнь	61,57±8,20	0,31±0,04	0,43±0,06	0,74±0,05	41,68
	Июль	<b>71,47±9,09</b>				
	Август	60,54±9,44				
	<i>Среднее</i>	64,53±8,91				
9	Июнь	39,58±6,10	0,30±0,06	0,33±0,04	0,63±0,05	47,19
	Июль	36,89±5,85				
	Август	31,34±5,00				
	<i>Среднее</i>	35,94±10,41				

Примечание: Жирным обозначен максимум смолы выделения в целом на межканальном пространстве.

В древостое после выборочной заготовки древесины (табл. 5), при непосредственной близости сосен к каналам, наблюдаются завышенные потеки терпентина в июне, а у деревьев, произрастающих в центре осушаемой полосы, – в июле. Максимум выделения пасоки зафиксирован в июле, что вполне может быть связано с комплексным влиянием на древостой последствий гидротехнической мелиорации и заготовки древесины (значительного разреживания древостоя на лесосеке).

В среднем у древостоев межканального и приканального положения на двух пасеках значимых отличий макроструктуры обнаружить не удалось.

Самое большое выделение терпентина (в целом на краю и в центре пасеки) зафиксировано в межканальном положении (июнь – 58 см). Здесь же в среднем за три летних месяца потеки больше на 7 %, что, вероятно, вновь связано с совместным отрицательным влиянием заготовки древесины и лесосушения. Различия средних показателей статистически не удалось доказать даже на минимальном уровне значимости с использованием критерия Стьюдента ( $t_{\text{факт}} \leq t_{\text{ст}}; 0,62 \leq 0,69$ ).

Таблица 5

**Выделение терпентина на объекте выборочной заготовки древесины,  
среднее на двух пасеках за пять лет наблюдений**

Положение объекта	Месяц наблюдений	Средние показатели				
		Потеки живицы, см ( $M \pm m_M$ )	ПД, мм ( $M \pm m_M$ )	РД, мм ( $M \pm m_M$ )	ШГК, мм ( $M \pm m_M$ )	Доля ПД от ШГК, %
КП, ПК	Июнь	<b>55,50±6,15</b>	0,59±0,08	0,73±0,08	1,32±0,08	44,54
	Июль	51,02±7,18				
	Август	50,96±6,19				
	<i>Среднее</i>	52,49±6,31				
ЦП, ПК	Июнь	<b>60,18±8,52</b>	0,57±0,08	0,66±0,09	1,23±0,08	45,48
	Июль	54,60±8,31				
	Август	48,68±6,46				
	<i>Среднее</i>	54,57±7,30				
КП, МК	Июнь	62,41±7,77	0,63±0,07	0,87±0,09	1,50±0,08	42,09
	Июль	<b>64,59±7,88</b>				
	Август	56,78±7,56				
	<i>Среднее</i>	59,58±7,66				
ЦП, МК	Июнь	54,79±7,84	0,56±0,06	0,67±0,08	1,23±0,07	46,22
	Июль	<b>57,67±9,27</b>				
	Август	47,33±6,26				
	<i>Среднее</i>	52,44±7,39				

Примечание: КП – край пасеки; ЦП – центр пасеки. Жирным шрифтом обозначены максимумы смолы выделения в разных частях пасек древостоя.

На объекте гидромелиорации (табл. 6) в отдельные годы установлены следующие зависимости (регрессионный анализ). В 2009 г. для приканального сосняка при отрицательной корреляции ( $-0,79$ ;  $t_r = -10,54$ ) и достаточно высоком уровне аппроксимации получено уравнение  $y = 16,891e^{0,1903x}$  ( $R^2 = 0,9581$ ) для зависимости длины потека в августе от прироста ранней древесины и ширины годичного кольца ( $r = -0,79$  при  $t_r = -10,54$  и  $r = -0,78$  при  $t = -9,90$ ).

В 2010 г. выявлен высокий положительный уровень связи ( $0,72$ ;  $t_r = 7,17$ ) между выделением терпентина и шириной годичного слоя для древостоя межканального положения (в центре осушаемой полосы). Подобрано уравнение полинома второго порядка  $y = 0,0281x^2 - 0,3054x + 0,9773$  с высоким уровнем аппроксимации ( $R^2 = 0,9371$ ).

Таблица 6

**Связь выделения терпентина с макроструктурой древесины  
(контроль – осушаемый сосняк), среднее за пять лет наблюдений**

ПП	Параметр макроструктуры	Коэффициент корреляции и его достоверность по месяцам наблюдений							
		Июнь		Июль		Август		Среднее	
		r	t <sub>r</sub>	r	t <sub>r</sub>	r	t <sub>r</sub>	r	t <sub>r</sub>
8	ПД	-0,21	-1,18	<b>-0,35</b>	<b>-2,07</b>	<b>-0,48</b>	<b>-3,49</b>	<b>-0,46</b>	<b>-3,06</b>
	РД	-0,22	-1,33	-0,29	-1,74	<b>-0,46</b>	<b>-4,02</b>	-0,23	-2,96
	ШГК	-0,22	-1,28	<b>-0,33</b>	<b>-2,00</b>	<b>-0,49</b>	<b>-4,13</b>	<b>-0,46</b>	<b>-3,26</b>
9	ПД	0,27	2,06	0,26	2,11	0,26	1,44	0,31	2,06
	РД	0,15	0,77	0,09	-0,20	0,24	1,84	0,16	1,03
	ШГК	0,26	2,09	<b>0,35</b>	<b>1,31</b>	0,26	1,44	0,27	1,73

При усреднении длины потека терпентина и ширины годичного кольца за пять лет в августе на приканальной полосе древостоя обнаружена значимая отрицательная связь ( $-0,68 \pm 0,11$ ;  $t_r = -6,08$ ). На основании полученных рядов распределения был проведен регрессионный анализ, в ходе которого подобрано полиномиальное уравнение шестого порядка (рис. 2):  $y = 0,0001x^6 - 0,0054x^5 + 0,0791x^4 - 0,5624x^3 + 2,0149x^2 - 3,3780x + 2,8721$ , по нему с вероятностью ошибки 43 % ( $R^2 = 0,5779$ ) можно определять данные по потекам, имея в наличии сведения о мощности годичных колец.

Следует отметить, что в июне, практически на начальном этапе роста деревьев, не выявлено значимой связи ни с одним из рассматриваемых показателей.

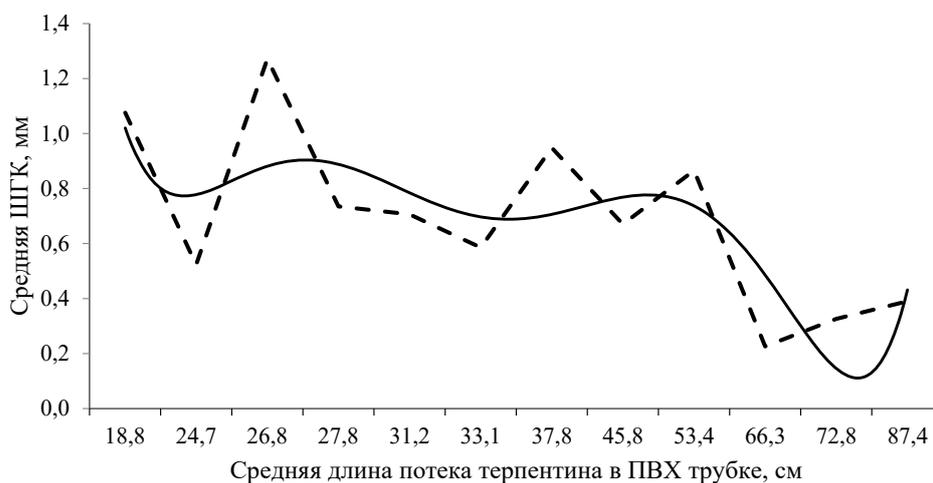


Рис. 2. Зависимость флюктуации потеков соснового терпентина от ширины годичного кольца

Fig. 2. Dependence of pine turpentine streak fluctuation on the annual ring width

При расчете критерия Фишера доказана правильность выбора полиномиальной зависимости  $F_{\text{табл}}(5,12) \leq F_{\text{расч}}(12,4)$ .

На объекте несплошной лесозаготовки (табл. 7) за летние месяцы 3-летнего периода эксперимента (в среднем) установить зависимость выделения терпентина от макроструктуры древесины в радиальном сечении не удалось.

Таблица 7

**Связь выделения терпентина и макроструктуры древесины  
на объекте выборочной заготовки древесины за три года наблюдений**

Положение объекта	Параметр макроструктуры	Коэффициент корреляции и его достоверность по месяцам наблюдений							
		Июнь		Июль		Август		Среднее	
		r	t <sub>r</sub>	r	t <sub>r</sub>	r	t <sub>r</sub>	r	t <sub>r</sub>
КП, ПК	ПД	-0,06	-0,18	-0,14	-0,60	0,08	1,72	0,06	0,34
	РД	0,27	1,32	0,19	0,14	<b>0,36</b>	<b>2,21</b>	<b>0,39</b>	<b>3,89</b>
	ШГК	0,15	0,87	0,07	0,16	0,28	1,68	0,24	1,13
ЦП, ПК	ПД	0,08	0,39	-0,08	-0,50	-0,17	-1,24	-0,04	-0,24
	РД	0,14	0,78	-0,17	-0,78	-0,25	-1,23	-0,06	-0,31
	ШГК	0,12	0,55	-0,16	-0,84	-0,25	-1,37	-0,07	-0,43
КП, МК	ПД	0,19	1,25	0,05	0,29	<b>-0,36</b>	<b>-2,68</b>	0,01	0,02
	РД	0,06	0,37	0,14	0,70	-0,02	-0,07	0,07	0,33
	ШГК	0,18	0,95	0,07	0,42	-0,22	-1,20	0,07	0,34
ЦП, МК	ПД	-0,10	-0,29	0,27	1,92	0,02	0,15	0,10	0,73
	РД	0,05	0,29	0,17	0,90	0,07	0,37	0,13	0,72
	ШГК	-0,01	-0,07	0,25	1,04	0,16	0,97	0,19	1,23

С некоторым допущением можно выделить положительный уровень связи (в целом за три летних месяца) потека терпентина и прироста ранней древесины у деревьев, находящихся на краю пасеки, оставленной на доращивание, и в приканальном положении. В межканальном положении средний отрицательный уровень связи между потеками и приростом поздней древесины обнаружен в августе, также с края пасеки. Кроме того, следует отметить, что связи параметров макроструктуры древесины и потека терпентина в июле и августе на двух исследованных пасеках древостоя (чаще – в июле) по большей части отрицательные.

*Заключение*

По результатам детального анализа связи выделения терпентина при закрытом способе подсочки (экспресс-метод микроранений) и макроструктуры древесины в радиальном сечении было установлено, что в заболоченных, осушаемых и пройденных выборочной заготовкой древесины сосняках уровень

зависимости между данными признаками низкий. Это указывает на необходимость более углубленных расширенных исследований (с учетом физиологических и фенотипических особенностей деревьев) для экспресс-прогнозирования смолопродуктивности сосняков по радиальному приросту.

Для территории осушаемых древостоев, где ранее проведены выборочные рубки (ширина пазек – 15 м, угол соединения их с магистральным волоком – 45° при параллельном расположении регулирующего канала), и болотного массива выявлены наибольшие положительные отличия по потоку терпентина (край пазеки и межканальное положение), приросту поздней (небольшое увеличение у деревьев с края пазеки) и ранней (межканальное положение и край пазеки) древесины, ширине годичного кольца (аналогично предыдущему параметру), содержанию поздней древесины в годичном кольце (приканальное положение и центр пазеки).

На основании полученных в ходе исследования рядов распределения у осушаемых древостоев был проведен регрессионный анализ, который позволил подобрать полиномиальное уравнение шестого порядка, прогнозирующее с вероятностью ошибки 43 % данные по выделению соснового терпентина с помощью сведений о толщине годичных колец.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабиков Б.В. Становление и развитие гидромелиорации в лесном хозяйстве // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 53–57. Babikov B.V. Establishment and Development of Hydromelioration in a Forestry Enterprise. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 2, pp. 53–57. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ed2/lh5.pdf>
2. Вернодубенко В.С. Динамика хвойных древостоев на торфяных почвах Европейского Севера: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2011. 20 с. Vernodubenko V.S. *Dynamics of Coniferous Stands on Peat Soils of the European North*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2011. 20 p.
3. Глаголев В.А., Кулаков Г.В. Мониторинг лесов: организация и ведение лесного мониторинга. М.: Б.и., 1996. 110 с. Glagolev V.A., Kulakov G.V. *Forest Monitoring: Management of Forest Monitoring*. Moscow, B.i. Publ., 1996. 110 p.
4. Григорюк Г.П. Терпеноиды хвойных растений – источник фитонцидных препаратов // Лесопромышленный комплекс России XXI века: тез. докл. Междунар. лесопром. конф. СПб., 2001. С. 111. Grigoryuk G.P. Terpenoids of Coniferous Plants as a Source of Phytoncidal Preparations. *Timber Industry Complex of Russia in the XXI Century: Proceedings of the International Timber Industry Conference*. Saint Petersburg, 2001, p. 111.
5. Дружинин Н.А., Неволин Н.Н. Осушение лесов в Вологодской области: моногр. Вологда: МДК, 2001. 102 с. Druzhinin N.A., Nevolin N.N. *Drainage of Forests in the Vologda Region*: Monograph. Vologda, MDK Publ., 2001. 102 p.
6. Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н., Пестовский А.С., Новосёлов А.С. Прижизненное и побочное пользования осушаемых лесов Вологодской области: моногр. / под общ. ред. А.С. Новосёлова. Вологда: ИЦ ВГМХА, 2011. 192 с. Druzhinin N.A., Druzhinin F.N., Pestovskiy A.S., Novoselov A.S. *Intravital and Side Use of Drained Forests of the Vologda Region*: monograph. Ed. by A.S. Novoselov. Vologda, Vologda SDFa Publ., 2011. 192 p.
7. Константинов В.К., Порошин А.А. Состояние гидроресомелиоративных систем и их реконструкция. СПб.: СПбНИИЛХ, 2007. 135 с. Konstantinov V.K., Poroshin A.A. *State of Hydro-Forest Reclamation Systems and Their Reconstruction*. Saint Petersburg, SPbNIIHL Publ., 2007. 135 p.

8. Кусакин А.В., Шведова Т.Е. Гидротехнические мелиорации. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010. 208 с. Kusakin A.V., Shvedova T.E. *Hydrotechnical Reclamation*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2010. 208 p.

9. Ловелиус Н.В., Лежнева С.В. Изменения прироста годичных колец сосны и ели в восточноевропейской тайге в связи с геофизическими факторами среды: моногр. / РГПУ им. А.И. Герцена; ВоГУ; Петров. акад. наук и искусств. СПб.; Вологда: ВОУНБ, 2015. 178 с. Lovelius N.V., Lezhneva S.V. *Changes in the Growth of Annual Rings of Pine and Spruce in the Eastern European Taiga in Connection with the Geophysical Factors of the Environment*: Monograph. Vologda, VOUNB Publ., 2015. 178 p.

10. Мариничев Е.А. Лесоводственная эффективность прореживаний в сосновых древостоях на осушаемых землях в условиях южной и средней подзон тайги (на примере Вологодской области): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2005. 21 с. Marinichev E.A. *Forestry Efficiency of Thinning in Pine Stands on Drained Lands in the Southern and Middle Taiga Subzones (Case Study of the Vologda Region)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2005. 21 p.

11. Петрик В.В., Высоцкий А.А., Фролов Ю.А., Подольская В.А. Методы повышения смолопродуктивности сосняков. Архангельск: АГТУ, 2006. 200 с. Petrik V.V., Vysotskiy A.A., Frolov Yu.A., Podol'skaya V.A. *Methods for Increasing the Resin Productivity of Pine Forests*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2006. 200 p.

12. Рябчук В.П., Гриб В.М., Осадчук Л.С., Юськевич Т.В. Подсочка лісу та лісохімія. Київ: ІНКІОС, 2012. 204 с. Ryabchuk V.P., Grib V.M., Osadchuk L.S., Yus'kevich T.V. *Resin Tapping and Forest Chemistry*. Kiev, INKOS Publ., 2012. 204 p.

13. Третьяков С.В. Полевой лесотаксационный справочник: науч. изд. / под общ. ред. С.В. Третьякова, С.В. Ярославцева, С.В. Коптева. Архангельск: САФУ, 2016. 245 с. Tretyakov S.V. *Field Forest Inventory Handbook (Scientific Publication)*. Ed. by S.V. Tretyakov, S.V. Yaroslavtsev, S.V. Koptev. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 245 p.

14. Федотов И.В. Мониторинг состояния осушаемых лесов и ведение хозяйства в них на примере Архангельской области: дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2016. 190 с. Fedotov I.V. *Monitoring of the State of Drained Forests and Management in Them (Case Study of the Arkhangelsk Region)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2016. 190 p.

15. Федяев А.Л. Влияние осушения на смолопродуктивность сосновых древостоев Вологодской области и эффективность их промышленной подсочки: дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 1995. 167 с. Fedyayev A.L. *Influence of Drainage on Resin Productivity of Pine Stands of the Vologda Region and Efficiency of Their Industrial Tapping*: Cand. Agric. Sci. Diss. Yekaterinburg, 1995. 167 p.

16. Helming K., Tscherning K., König B., Sieber S., Wiggering H., Kuhlman T., Wascher D., Perez-Soba M., Smeets P., Tabbush P., Dilly O., Hüttl R., Bach H. Ex Ante Impact Assessment of Land Use Change in European Regions – the SENSOR Approach. *Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes*. Ed. by K. Helming, M. Pérez-Soba, P. Tabbush. Berlin, Springer, 2008, pp. 77–105. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-78648-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78648-1_6)

17. Indriksons A.P. Forest Stand Productivity and Soil Fertility in Drained Pine Forests on Peaty Soils. *Latvijas Lauksaimniecības universitāte raksti* [Proceedings of the Latvia University of Agriculture], 2001, iss. 3, pp. 65–72.

18. Mäkinen H., Hynynen J. Wood Density and Tracheid Properties of Scots Pine: Responses to Repeated Fertilization and Timing of the First Commercial Thinning. *Forestry*, 2014, vol. 87, iss. 3, pp. 437–447. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu004>

19. Neippola J. Long-Term Vegetation Changes in Stands of *Pinus sylvestris* in Southern Finland. *Journal of Vegetation Science*, 1992, vol. 3, iss. 4, pp. 475–484. DOI: <https://doi.org/10.2307/3235804>

20. Punttila P., Autio O., Kotiaho J.S., Kotze D.J., Loukola O.J., Noreika N., Vuori A., Vepsäläinen K. The Effects of Drainage and Restoration of Pine Mires on Habitat Structure, Vegetation and Ants. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 2, art. 1462. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.162>

УДК 631.423.3.4:630\*181.351

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-118-131

## ПОЧВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМБРИОЗЕМОВ ПОД ПОКРОВОМ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ТЕХНОГЕННЫХ ЭЛЮВИЯХ КУЗБАССА

**Е.Ю. Колмогорова, канд. биол. наук; ResearcherID: [J-4549-2018](https://orcid.org/0000-0002-5703-7168),**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5703-7168>

**В.И. Уфимцев, канд. биол. наук; ResearcherID: [J-9268-2018](https://orcid.org/0000-0001-5854-5802),**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5854-5802>

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН, просп. Ленинградский, д. 10, г. Кемерово, Россия, 650065; e-mail: kolmogorova\_elena@bk.ru, uwy2079@gmail.com

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 27.03.20 / Принята к печати 08.08.20

**Аннотация.** Изучена эдификаторная роль сосны на техногенных ландшафтах Кузнецкого угольного бассейна. Рассмотрено влияние насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с разной сомкнутостью крон на основные характеристики эмбриоземов на отвалах вскрышных пород угольной промышленности. Объектом исследования служили образцы почвы, собранные в различных зонах фитогенных полей сосны, произрастающей на бестранспортном отвале Кедровского угольного разреза. При выборе пробных площадей проведено ранжирование насаждений по сомкнутости крон на несомкнутые (сомкнутость крон около 30 %), среднесомкнутые (около 60 %) и сомкнутые (около 90 %). В каждой градации сомкнутости выделены зоны влияния (фитогенных полей) деревьев – подкروновые, прикروновые (промежуточные). Точки отбора выбирали с учетом наличия идентификационных признаков – сплошного опада сосны (подкروновая зона), развитого мохового покрова (прикروновая зона), развитой луговой растительности (внешняя зона). В несомкнутых и среднесомкнутых насаждениях внешние зоны не встречаются. Всего по степени сомкнутости крон и зонированию фитогенных полей выделено 7 участков насаждений *P. sylvestris*. Образцы почвы отбирали на каждом из них с глубины 0–20 см в III декаде сентября. Активность ферментов изучали в свежесобранной почве в 3-кратной повторности; фракционный состав почв и их агрохимические свойства – в высушенной почве. Показано, что сосновые насаждения способствуют ускорению дезинтеграции техногенных элювиев с образованием мелкоземных фракций, имеющих важное почвенно-экологическое значение. Формирование подстилки, содержащей значительную долю опада травянистой растительности, в несомкнутых насаждениях сосны благоприятствует накоплению в эмбриоземах общего азота. Выявлена зависимость количества легкодоступных форм фосфора и калия от литогенных, а не от фитocenотических факторов. Изучение ферментативной активности почв показало снижение фосфатазной активности с увеличением содержания фосфора и повышение протеазной активности с увеличением содержания азота. Агрохимические показатели эмбриоземов благоприятны для произрастания травянистых растений ввиду горизонтальной дифференциации пространства под влиянием древостоев сосны обыкновенной.

**Для цитирования:** Колмогорова Е.Ю., Уфимцев В.И. Почвенные характеристики эмбриоземов под покровом сосновых насаждений на техногенных элювиях Кузбасса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 118–131. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-118-131

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках проекта № АААА-А17-117041410053-1 (0352-2019-0015 VI.52. Оценка состояния и охрана флористического разнообразия под влиянием антропогенных и техногенных факторов *in situ* и *ex situ*).

**Ключевые слова:** эмбриоземы, фракционный состав почвы, агрохимические характеристики почвы, фосфатаза, протеаза, сосна обыкновенная, фитогенное поле.

## SOIL CHARACTERISTICS OF EMBRYOZEMS UNDER COVER OF PINE PLANTATIONS ON TECHNOGENIC RESIDUAL ROCKS OF KUZBASS

*Elena Yu. Kolmogorova*, Candidate of Biology; ResearcherID: [J-4549-2018](https://orcid.org/0000-0002-5703-7168),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5703-7168>

*Vladimir I. Ufimtsev*, Candidate of Biology; ResearcherID: [J-9268-2018](https://orcid.org/0000-0001-5854-5802),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5854-5802>

The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Leningradskiy, 10, Kemerovo, 650065, Russian Federation; e-mail: kolmogorova\_elena@bk.ru, uwy2079@gmail.com

---

Original article / Received on March 27, 2020 / Accepted on August 8, 2020

---

**Abstract.** The article studies the edificatory role of pine growing on the technogenic landscapes of the Kuznetsk coal basin and considers the influence of plantations of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with different crown density on the main characteristics of embryozems on the overburden dumps of the coal mining industry. The object of the study was soil samples collected in various zones of the phytogenic fields of pine growing on the transport-free dump of the Kedrovsky coal mine. When choosing test plots, the plantations were ranked according to crown density into unclosed (crown density about 30 %), medium-closed (about 60 %) and closed (about 90 %). In each gradation of closeness, the following zones of influence (phytogenic fields) of trees were identified: undercrown, near-crown (intermediate). The selection of sampling points was carried out taking into account the presence of the identification signs: solid pine litter (undercrown zone), developed moss cover (near-crown zone) and developed meadow vegetation (outer zone). External zones are not found in unclosed and medium-closed plantations. In total, according to the degree of crown density and zoning of phytogenic fields, 7 plantation sites of *Pinus sylvestris* were identified. Soil samples were taken at each of them from a depth of 0–20 cm in the 3rd decade of September. The enzyme activity was studied in recently collected soil in 3-fold replications. The fractional composition of soils and their agrochemical properties were determined in dried soil on the basis of the Center for Agrochemical Service “Kemerovo”. The analysis of the results showed that pine stands contribute to accelerated disintegration of technogenic residual rocks with the formation of fine-grained fractions, which are of great soil and environmental importance. Litter combined with grassy vegetation in open pine stands favors the accumulation of total nitrogen in embryozems. It was revealed that the content of readily available forms of phosphorus and potassium depends on lithogenic rather than phytocenotic factors. The study of the enzymatic activity of soils showed that the phosphatase activity decreases with an increase in the phosphorus content, and the protease activity increases with an increase in the nitrogen content. Agrochemical indicators of embryozems are favorable for the growth of herbaceous plants due to horizontal differentiation of space under the influence of stands of Scots pine.

**For citation:** Kolmogorova E.Yu., Ufimtsev V.I. Soil Characteristics of Embryozems under Cover of Pine Plantations on Technogenic Residual Rocks of Kuzbass. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 118–131. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-118-131

**Funding:** The work was carried out within the project No. AAAA-A17-117041410053-1 (0352-2019-0015 VI.52. Assessment of the State and Protection of Floristic Diversity under the Impact of Anthropogenic and Technogenic Factors *in situ* and *ex situ*).

**Keywords:** embryozems, soil fractional composition, soil agrochemical characteristics, phosphatase, protease, Scots pine, phytogenic field.

### Введение

Деревья-лесообразователи, играя роль эдификатора, прямым или косвенным образом оказывают существенное влияние на все компоненты экосистемы [22, 26]. Особенно это влияние распространяется на почвенные характеристики в пределах досягаемости корневых систем за счет механического и биохимического преобразования ими почвенных агрегатов и в пределах наземных частей деревьев – кроны и вторичных метаболитов подстилки [11, 21, 24].

В естественных лесных экосистемах Кемеровской области сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) не является основной лесообразующей породой, занимая всего 148,9 тыс. га, или 2,8 % площади лесного фонда [6]. Однако на отвалах вскрышных пород угольной промышленности значение сосны существенно возрастает – до 12–15 тыс. га, или почти 50 % всех рекультивированных земель в регионе, что позволяет рассматривать эту древесную породу как основной эдификатор техногенных лесных экосистем.

Особенностью сосновых насаждений на участках рекультивации становится широкий спектр густоты – от 0,2 до 4,0 тыс./га, и сомкнутости лесного полога – от 20 до 90 % [16]. Такая вариабельность древостоев способствует формированию живого напочвенного покрова с совершенно различными характеристиками [18] и подстилки с неодинаковыми фракциями опада в зависимости от особенностей насаждений и расположения относительно деревьев. В результате воздействия многогранного сочетания факторов под покровом сосновых насаждений молодой почвенный покров техногенных экосистем трансформируется в соответствии с особенностями растительных сукцессий и формирующейся горизонтальной дифференциацией пространства.

Актуальность исследования обусловлена тем, что до последнего времени древесные насаждения на отвалах изучались как однородные участки древесной растительности, без учета ранжирования древостоев по сомкнутости кроны. Подобным образом проводились и почвенные исследования, которые часто отражали лишь характеристики эмбриоземов под покровом высокосомкнутых насаждений, в связи с чем складывается общее представление об однозначно неблагоприятном влиянии лесных насаждений на эволюцию эмбриоземов. Сосна и в естественных условиях на нелесных территориях способствует подкислению почв в подкروновых пространствах [7]. В то же время исследованиями не подтверждается тезис об однозначном ухудшении характеристик почв под сосновыми культурами [25].

Контрастная дифференциация насаждений на отвалах как по сомкнутости кроны, так и по мозаичности живого напочвенного покрова позволяет утверждать, что и характеристики эмбриоземов могут претерпевать различную трансформацию под воздействием названных особенностей. Изучение почв техногенных ландшафтов под лесными культурами также показало мозаичность почвенного

покрова [2], однако специальных работ о влиянии вариаций сомкнутости лесного полога на изменение характеристик эмбриоземов нет.

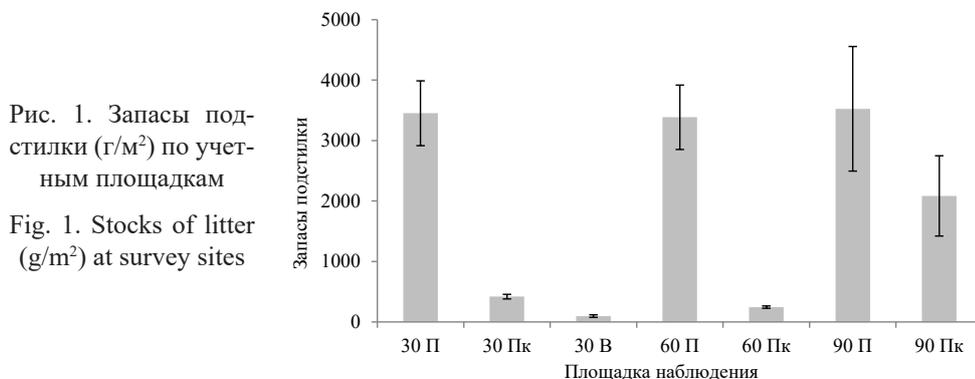
Цель исследования – выявление особенностей гранулометрического состава и основных агрохимических свойств эбриоземов под покровом разносомкнутых сосновых насаждений, произрастающих на участках рекультивации угольной промышленности.

#### Объекты и методы исследования

Исследования проводились на постоянных пробных площадях, заложенных в 2014 г. в сосновых насаждениях на бестранспортном отвале Кедровского угольного разреза в Кемеровской области. Насаждения относятся ко II классу возраста (28–30 лет), I–II классам бонитета, характеризуются благонадежным жизненным состоянием [16].

В основу ранжирования модельных площадок положены сомкнутость крон (СК) и зонирование фитогенных полей (ФП) в насаждениях. Выделено 7 участков: в несомкнутых насаждениях (СК 30 %) – подкروновые (30 П), прикroновые (30 Пк) и внешние (30 В) зоны, в среднесомкнутых (СК 60 %) – подкroновые (60 П) и прикroновые (60 Пк), в сомкнутых (СК 90 %) – подкroновые (90 П) и прикroновые (90 Пк). Зонирование ФП выполнялось в соответствии с применяемыми идентификационными признаками [8, 17].

Ранее нами проведены работы по оценке запасов подстилки на указанных площадках (рис. 1).



В подкroновых зонах запасы подстилки в насаждениях с неодинаковой сомкнутостью крон различий не имеют и составляют в воздушно-сухом состоянии 2377–2966 г/м<sup>2</sup>. В прикroновых зонах несомкнутых и среднесомкнутых насаждений запасы подстилки по сравнению с подкroновыми снижаются в 8,2–13,8 раза, в сомкнутых насаждениях эти различия незначительны. Во внешней зоне несомкнутых насаждений запасы подстилки в 35,9 раза ниже, чем в подкroновой зоне. Таким образом, равномерность размещения подстилки в насаждениях обратно пропорциональна сомкнутости крон. В подкroновой зоне в опад преобладают хвоя – 54–80 %, и шишки – 20–35 %. В прикroновой зоне доля хвои увеличивается до 64–83 %, опад травянистых растений составляет около 2 %. Во внешней зоне подстилка почти целиком состоит

из опада луговой растительности, хвоя не обнаружена, шишки встречаются единично.

Фракционный состав почв и их агрохимические свойства определяли в испытательном центре Федерального государственного бюджетного учреждения «Центр агрохимической службы «Кемеровский», аттестат аккредитации – RA.RU.21ПУ81.

Для оценки запасов гумуса и легкодоступных форм фосфора и калия использованы стандартные шкалы [5], обеспеченности доступными формами азота – шкала Г.П. Гамзикова [1], содержания общего азота – данные об этом показателе в почвах Кузнецкой котловины [13].

Почвы отбирали на каждом изучаемом участке с глубины 0–20 см, т. к. в верхних слоях почвы наблюдается наибольшая активность почвенных ферментов [19]. Сроки отбора образцов – III декада сентября. Ферменты изучали в свежесобранной почве в 3-кратной повторности из смешанной пробы. Активность протеазы определяли по методу А.Ш. Галстяна и Э.А. Арутюнян [10], фосфотазы – по методу А.Ш. Галстяна [14]. Для оценки биологической активности почв использовали общепринятые шкалы [10].

В целях выявления почвенного плодородия техногенных элювиев был заложен методом фитометров вегетационный опыт. Метод заключается в выращивании контрольных видов растений в лизиметрах с устранением эффекта факторов среды: освещенности, увлажнения, прямой конкуренции и др. Образцы субстрата эмбриоземов отбирались в 3-кратной повторности по всем учетным площадкам в несомкнутых насаждениях в подкрановой, прикрановой и внешней зонах ФП (как наиболее контрастных вариантах) и помещались в ящики-лизиметры размером 20×35×55 см. В почву каждой зоны высевали по 100 семян *Poa pratensis* L., *Melilotus officinalis* L. и *Trifolium hybridum* L. Выбор данных видов обусловлен их положительной, приспособительной и отрицательной реакцией соответственно на совместное произрастание под покровом сосны обыкновенной [27]. В качестве контроля использована лугово-черноземная почва, взятая в подкрановой зоне *Acer negundo* L., показавшая наилучший результат плодородия по этим же видам растений [20]. В конце вегетации определяли массу и высоту 30 особей каждого вида.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Одним из важнейших параметров, характеризующих направленность почвообразовательного процесса на эмбриоземах, является гранулометрический состав в корнеобитаемом слое [3]. Гранулометрический состав зависит от двух последовательных процессов – физического выветривания и биохимической дезинтеграции. Первый из них протекает под воздействием абиотических факторов и приводит к образованию скелета почвы – частиц размером более 0,01 мм. Однако многие важнейшие свойства почвы как базиса наземной экосистемы, такие как гумусонакопление, буферность, водоудерживающая способность, зависят от фракций размером менее 0,01 мм, генезис которых обусловлен вследствие биохимических процессов, в том числе действия вторичных метаболитов растительных видов первичных сукцессий [4].

Формирование физической глины при дезинтеграции песчаников, алевролитов и особенно аргиллитов происходит, как правило, параллельно обра-

зованию мелкоземных фракций, и наоборот, отсутствие физической глины вызвано слабым образованием мелкозема. Исследованиями лаборатории рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук установлено, что процессы эволюции эмбриоземов на техногенных элювиях Кузбасса наиболее активны при содержании в почве мелкозема не менее 25 % и присутствии в нем фракций физической глины не менее 30 % [3]. Исходя из этого количество мелкозема > 25 % (30 П, 30 ПК, 90 П, 90 ПК) можно классифицировать как достаточное (++), < 25, (30 В, 60 П, 60 ПК) – как дефицитное (+). Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о более интенсивных процессах дезинтеграции во внутренних зонах фитогенных полей сосны на отвалах, что, вероятно, связано с активной корневой деятельностью и обилием эктомикориз.

Таблица 1

## Фракционный состав почв на отвалах

Учетные площадки	Содержание фракций грунта, %, размерами, мм						Преобладающие фракции	Мелкозем, %, размером < 1 мм	Обеспеченность мелкоземом
	> 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	< 0,5			
	Глыбы	Камни	Гравий	Песок крупный	Песок мелкий	Песок мелкий, пыль и коллоиды			
30 П	18,68	8,27	14,28	17,18	17,22	24,37	< 1	41,59	++
30 ПК	4,58	10,84	21,47	17,74	21,01	24,36	< 1	45,37	++
30 В	29,64	20,56	21,55	10,41	7,82	10,02	> 5	17,84	+
60 П	6,11	23,40	33,99	17,35	9,84	9,31	10–2	19,15	+
60 ПК	8,83	18,19	32,58	17,92	11,36	11,12	10–2	22,48	+
90 П	6,68	7,71	18,05	20,23	20,38	26,95	< 1	47,33	++
90 ПК	10,05	11,67	18,29	18,56	16,54	24,89	< 1	41,43	++

Кислотность почвенного раствора в подкромовых зонах слабокислая – 6,0–6,6, и только во внешней зоне несомкнутых насаждений – нейтральная – 7,1 (табл. 2), что закономерно, т. к. опад хвойных пород при естественном облесении нелесных площадей приводит к подкислению почв [28]. Таким образом, уже на начальном этапе развития техногенной лесной экосистемы сосна обыкновенная оказывает влияние на кислотность почвы, с которой тесно связана жизнедеятельность почвенных организмов, формируются характерные для сосновых насаждений микомицеты [12].

Сумма поглощенных оснований в эмбриоземах колеблется от 19,2 до 48,4 ммоль/100 г. Наибольшее значение этого параметра отмечено во внешней зоне редин, что, вероятно, объясняется ее постоянным обогащением легкоразлагаемым органическим материалом травянистой растительности. Степень насыщенности почв основаниями показывает, сколько процентов общей емкости поглощения занимают основания, и является важной характеристикой буферности почв.

Таблица 2

## Агрохимические свойства почв на отвалах

Показатель	30 П	30 Пк	30 В	60 П	60 Пк	90 П	90 Пк
рН водной вытяжки	6,6±0,1	6,5±0,1	7,1±0,1	6,0±0,1	6,6±0,1	6,4±0,1	6,6±0,1
Органическое вещество, %	13,7±1,4	14,1±1,4	11,4±1,1	10,3±1,0	7,7±0,8	9,7±1,0	10,3±1,0
Фосфор подвижный, мг/кг	49±7	41±6	24±4	55±7	82±10	37±6	17±3
Калий обменный, мг/кг	180±18	160±16	165±17	180±18	170±17	125±13	100±15
Сумма поглощенных оснований, ммоль/100 г	29,6±4,4	21,6±3,2	48,4±7,3	21,2±3,2	20,8±3,1	19,2±2,9	40,8±6,1
Массовая доля общего азота, %	0,35±0,02	0,38±0,03	0,31±0,02	0,27±0,02	0,12±0,01	0,23±0,02	0,22±0,02
Массовая доля нитратного азота, мг/кг	< 2,8	< 2,8	< 2,8	< 2,8	< 2,8	< 2,8	< 2,8
Массовая доля аммонийного азота, мг/кг	8,6±1,3	12,7±1,3	5,0±0,8	5,2±0,8	5,0±0,8	2,6±0,4	3,1±0,5

Агрохимический анализ демонстрирует повышенное и высокое содержание органического вещества: максимальное его накопление отмечается в несомкнутых насаждениях 11,4–14,1 %, что связано, скорее всего, с сочетанием разложения древесного и травянистого опада на разных стадиях разложения и гумификации вследствие активного развития травостоя во всех зонах фитогенных полей одиноко стоящих деревьев. В подкروновых и прикroновых зонах количество органического вещества существенно выше, чем во внешней, где сосновый опад практически отсутствует. Это согласуется с особенностями накопления лесной подстилки в данных зонах (см. рис. 1).

Если рассматривать органическое вещество как биогенный источник элементов питания растений, который оказывает существенное влияние на структурное состояние эмбриоземов, физические, водно-физические и физико-механические свойства почв; играет ведущую роль в их биологическом режиме, способствуя поддержанию определенного уровня биологической активности, то в подкroновых и прикroновых зонах несомкнутых насаждений

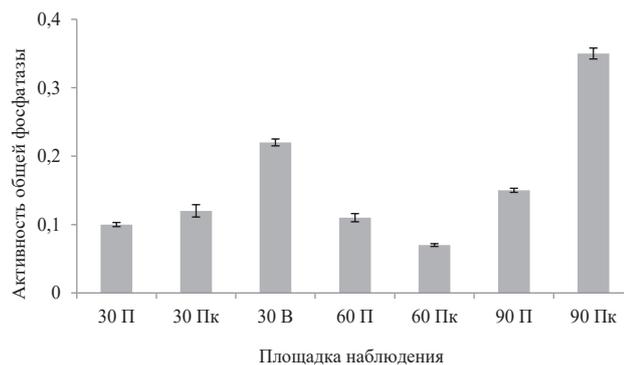
формируются наиболее благоприятные условия дезинтеграции техногенных элювиев.

Содержание подвижного фосфора в почве отвала на большинстве учетных площадок характеризуется как очень низкое и низкое (17–49 мг/кг). Некоторый всплеск уровня этого элемента отмечается в эмбриоземах среднесомкнутых насаждений – средняя обеспеченность (55–82 мг/кг), что, возможно, объясняется спорадическим присутствием в составе техногенного элювия повышенной доли алевролитов, которые, разрушаясь, образуют соли ортофосфорной кислоты. Фосфор играет важную роль в делении и развитии клеток, связан с механизмом обмена энергии в них. Лишь незначительная часть фосфора может поступать с атмосферными осадками и атмосферной пылью, поэтому источником фосфора на участках рекультивации становятся сами эмбриоземы или насаждения, которые преобразуют соединения фосфора, поднимая их из нижележащих горизонтов породы, и способствуют аккумуляции фосфора в приповерхностном слое в составе корневых выделений и/или подстилки. Отсутствие закономерности в содержании фосфора по зонам ФП свидетельствует о том, что сосновые молодняки II класса возраста не влияют на режим накопления фосфора в эмбриоземах.

Стоит отметить, фосфорное питание растений зависит не только от содержания в почве доступного на данный момент фосфора, но и от активности ряда ферментов, участвующих в переводе фосфора из запасного фонда в подвижные формы. Фосфатазная активность образцов, собранных в конце вегетационного периода (III декада сентября), характеризуется как очень слабая. Меньше всего общей фосфатазы накапливается в прикромной зоне среднесомкнутых насаждений (60 Пк) – 0,07 мг  $P_2O_5$  / г почвы за 30 мин. Максимум отмечен в прикромной зоне высокосомкнутых насаждений (рис. 2).

Рис. 2. Фосфатазная активность эмбриоземов (мг  $P_2O_5$  / г почвы за 30 мин) на учетных площадках (сентябрь 2018 г.)

Fig. 2. Phosphatase activity of embryozems (mg  $P_2O_5$  / g soil for 30 min) at survey sites (September 2018)



Из литературных источников известно, что при увеличении содержания подвижного фосфора в почве активность фосфатазы уменьшается [15]. Наши исследования в целом подтверждают эту закономерность.

Массовая доля общего азота в почвах колеблется от 0,12 до 0,38 %. Максимальный уровень азота отмечается во всех зонах ФП несомкнутых насаждений и соответствует содержанию общего азота в зональных почвах,

что обусловлено деятельностью травянистых видов. Содержание во всех образцах почвы нитратного азота  $< 2,8$  мг/кг – ниже предела обнаружения; аммонийного азота – очень низкое с максимальным количеством 8,7–12,6 мг/кг во внутренних зонах несомкнутых насаждений и минимальным – 2,6–3,1 мг/кг – в сомкнутых насаждениях. Среднесомкнутые насаждения по содержанию аммонийного азота занимают промежуточное положение.

Азот – важнейший элемент, участвующий в почвообразовании, содержание азота интегральным образом свидетельствует об интенсивности этого процесса, поэтому можно считать, что на данном этапе почвообразование в эмбриоземах протекает слабо. Однако наиболее вероятные предпосылки для усиления почвенно-экологического эффекта отмечаются под покровом несомкнутых сосновых насаждений, причем как за счет травянистых видов, так и за счет сосны, которая в условиях слабой внутривидовой конкуренции характеризуется максимальным развитием подземных органов, обеспечивающих функционирование симбиотрофных макромицетов. В сомкнутых насаждениях, как и в среднесомкнутых, травянистый покров значительно менее развит или отсутствует, а деревья сосны менее устойчивы и, несмотря на свою эдификаторную роль и способность поддерживать собственное азотное питание [23], не обеспечивают бездефицитность азотного режима местообитания в целом.

Интенсивность разложения азотосодержащего органического вещества в почве оценивают по ее протолитической активности. Протеазы расщепляют белки до полипептидов и аминокислот, далее они подвергаются гидролизу до аммиака, диоксида углерода и воды. Протеазы имеют важнейшее значение в жизни почвы, т. к. с ними связаны изменение состава органических компонентов и динамика усвояемых для растений форм азота. В связи с этим протеазную активность можно рассматривать как прогнозный индикатор азотного режима.

Как было выявлено, в прикромной зоне редины активность протеазы средняя – 3,5 мг глицина / г почвы за 24 ч; на остальных участках – слабая (рис. 3).

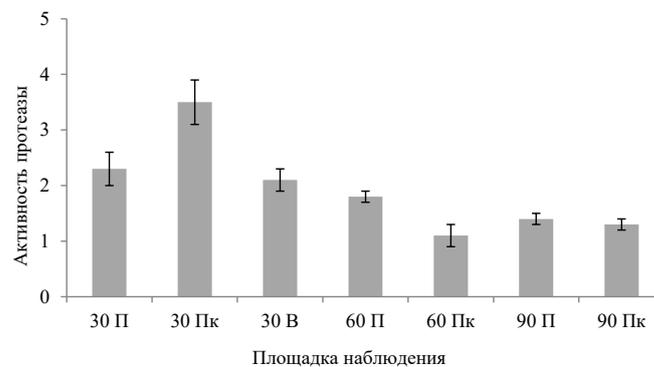


Рис. 3. Протеазная активность эмбриоземов (мг глицина / г почвы за 24 ч) на учетных площадках (сентябрь 2018 г.)

Fig. 3. Protease activity of embryozems (mg glycine / g soil for 24 h) at survey sites (September 2018)

Установлено, что с ростом содержания в почве общего азота повышается ее протеазная активность [9]. Нитраты и обменный аммоний являются основными источниками азота, обеспечивающими питание растений. Большая часть аммонийного азота в почве находится в поглощенном или обменном состоянии.

Почвы исследуемых участков достаточно обеспечены калием. Меньше всего калия в почве подкроновой и прикроновой зон высокосомкнутых насаждений – 125 и 100 мг/кг (средняя и повышенная обеспеченность) соответственно. На остальных участках обеспеченность калием повышенная и высокая. Больше всего калия в подкроновых зонах редин и среднесомкнутых насаждений – 180 мг/кг. Высокое содержание этого элемента свидетельствует о возрастании роли почвенно-поглощающего комплекса эмбриоземов в результате разложения техногенного элювия со значительным содержанием глинистых минералов – к обменной форме калия относится калий диффузного слоя почвенных коллоидов, являющийся основным источником питания растений. Учитывая, что калий – один из основных макроэлементов минерального питания, который участвует в процессах синтеза и оттока углеводов в растениях, обуславливает водоудерживающую способность клеток и тканей, влияет на устойчивость растений к засухе и поражаемость культур болезнями, его высокое содержание под покровом сосновых насаждений можно рассматривать как один из признаков устойчивости сосны, произрастающей на техногенных элювиях угольных месторождений.

Оценка плодородия методом фитометров показала соответствие габитуальных характеристик исследуемых видов их приуроченности к определенным зонам фитогенного поля сосны обыкновенной (табл. 3). *Melilotus officinalis* L., располагающийся в прикроновых зонах, во внешних зонах имеет минимальную массу, а *Poa pratensis* L., который формирует основное проективное покрытие в подкроновых зонах разреженных насаждений, – наименее развитые побеги в субстрате из прикроновых зон. *Trifolium hybridum* L. Произрастает во внешних зонах. Как и большинство луговых видов, он отрицательно реагирует на фитогенное поле сосны, не отвечает на различные субстраты изменением длины побега, но характеризуется максимальной фитомассой при выращивании на субстрате из внешней зоны.

Таблица 3

**Высота и масса побегов культур в почве, взятой в различных зонах фитогенного поля *Pinus sylvestris* L. на отвалах**

Зона произрастания	<i>Melilotus officinalis</i> L.	<i>Poa pratensis</i> L.	<i>Trifolium hybridum</i> L.
<i>Высота, см</i>			
Подкроновая	8,70±0,27	8,89±0,35	5,35±0,19
Прикроновая	6,42±0,30	5,79±0,23	5,45±0,26
Внешняя	4,86±0,25	6,26±0,29	5,50±0,29
<i>Масса, г</i>			
Подкроновая	1,315±0,005	0,340±0,003	0,642±0,003
Прикроновая	0,787±0,006	0,163±0,004	1,052±0,006
Внешняя	0,794±0,002	0,228±0,005	0,914±0,002

Таким образом, методом фитометров установлено, что реакция видов на произрастание с сосной обыкновенной на отвалах объясняется в том числе и почвенными условиями, характерными для каждой зоны фитогенного поля, поскольку каждый вид отвечает повышением ростовых процессов при выращивании в субстратах, взятых из этих зон.

### Заключение

Сосновые насаждения ускоряют дезинтеграцию техногенных элювиев с образованием мелкоземных фракций, имеющих важное почвенно-экологическое значение. Этот процесс наиболее выражен в подкروновых зонах несомкнутых насаждений. Резкое превышение здесь массы подстилки способствует накоплению органического вещества почвы, однако вследствие преобладания в подстилке опада сосны происходит подкисление эмбриоземов, в то время как во внешних зонах, где опад сосны не встречается, субстрат сохраняет нейтральную реакцию и обладает большей буферностью вследствие увеличения суммы поглощенных оснований под влиянием присутствия травянистой растительности.

Преобладание в подстилке опада травянистой растительности над опадом сосны в несомкнутых насаждениях благоприятствует накоплению в эмбриоземах общего азота и, в некоторой степени, его доступных форм. Недостаток аммонийного и особенно нитратного азота свидетельствует о начальной стадии становления режима питания местообитаний. Сосна обыкновенная не оказывает влияния на содержание легкодоступных форм фосфора и калия – оно зависит от литогенных, а не от фитоценологических факторов. Таким образом, эдификаторным механизмом сосны обыкновенной по преобразованию техногенных элювиев является накопление лесной подстилки, способствующей образованию органического вещества и улучшению азотного режима, и деятельность корневых систем, благоприятствующая дезинтеграции элювиев.

Фосфатазная и протеазная активность почвы напрямую зависят от содержания в ней фосфора и азота. С увеличением содержания фосфора фосфатазная активность снижается, с увеличением содержания азота растет протеазная активность. По агрохимическим показателям эмбриоземы благоприятны для произрастания травянистых растений вследствие горизонтальной дифференциации пространства под влиянием древостоев сосны обыкновенной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акулов П.Г., Афанасьев Р.А., Гамзиков Г.П., Гетманский В.З., Гурова Э.С., Иванова Т.И., Коробской Н.Ф., Костина Л.П., Никитин В.В., Новоселов С.И., Окорков В.В., Потатурина Н.В., Доманов Н.М., Цыгуткин А.С., Чичкин А.П., Чуб М.П., Шафран С.А., Ширинян М.Х. Научные основы и рекомендации по диагностике и оптимизации минерального питания зерновых и других культур. М.: Агроконсалт, 2000. 100 с. Akulov P.G., Afanas'yev R.A., Gamzikov G.P., Getmanskiy V.Z., Gyurova E.S., Ivanova T.I., Korobskoy N.F., Kostina L.P., Nikitin V.V., Novoselov S.I., Okorkov V.V., Potaturina N.V., Domanov N.M., Tsygutkin A.S., Chichkin A.P., Chub M.P.,

Shafran S.A., Shirinyan M.Kh. *Scientific Basis and Recommendations for Diagnosis and Optimization of Mineral Nutrition of Cereals and Other Crops*. Moscow, Agrokonsalt Publ., 2000. 100 p.

2. Андроханов В.А., Берлякова О.Г. Состояние лесных культур и почвенного покрова на рекультивированном отвале угольного разреза // Сиб. лесн. журн. 2016. № 2. С. 22–31. Androkhonov V.A., Berlyakova O.G. Condition of Forest Crops and Soil Cover at Reclaimed Dump of Coal Mine. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 2, pp. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160202>

3. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск: СО РАН, 2004. 151 с. Androkhonov V.A., Kulyapina E.D., Kurachev V.M. *Soils of Technogenic Landscapes: Genesis and Evolution*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2004. 151 p.

4. Артемкина Н.А., Лукина Н.В., Орлова М.А. Пространственное варьирование содержания вторичных метаболитов, углерода и азота в подстилках северотаежных ельников // Лесоведение. 2018. № 1. С. 37–47. Artemkina N.A., Lukina N.V., Orlova M.A. Spatial Variability of Secondary Metabolites, Carbon and Nitrogen in Litters of Spruce Forests in Northern Taiga. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2018, no. 1, pp. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0024114818010035>

5. ГОСТ Р 54650–2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Технические требования: дата введения 2013-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с. *State Standard. GOST R 54650–2011. Soils. Determination of Mobile Phosphorus and Potassium Compounds by Kirsanov Method Modified by CINAO*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 8 p.

6. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2014 году. Кемерово, 2015. 459 с. *Report on the State and Protection of the Environment of the Kemerovo Region in 2014*. Kemerovo, 2015. 459 p.

7. Журавлева Е.Н., Ипатов В.С., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. Изменение растительности на лугах под влиянием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Вестн. СПбГУ. Сер. 3.: Биология. 2012. Вып. 2. С. 3–12. Zhuravleva E., Ipatov V., Lebedeva V., Tikhodeeva M. Vegetation Changes in Meadows under the Influence of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Vestnik SPbGU. Seriya 3: Biologiya* [Biological Communications], 2012, iss. 2, pp. 3–12.

8. Крышень А.М., Хокканен Т. Фитогенное поле сосны // Тез. докл. Междунар. конф. «Экология таежных лесов». Сыктывкар, 1998. С. 87–88. Kryshen' A.M., Hokkanen T. Phytogenic Field of Pine. *Proceedings of the International Conference "Ecology of Taiga Forests"*. Syktyvkar, 1998, pp. 87–88.

9. Муртазина С.Г. Динамика азота и ферментативной активности под влиянием эрозии в почвах Республики Татарстан // Агрохим. вестн. 2006. № 6. С. 6–7. Murtazina S.G. Dynamics of Nitrogen and Enzymatic Activity under the Influence of Erosion in Soils of the Republic of Tatarstan. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Herald], 2006, no. 6, pp. 6–7.

10. Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. М.: МГУ, 2001. 689 с. *Workshop on Agrochemistry*. Ed. by V.G. Mineyev. Moscow, MSU Publ., 2001. 689 p.

11. Решетникова Т.В., Зырянова А.А., Ведрова Э.Ф. Трансформация органического вещества лесной подстилки (экспериментальное исследование) // Вестн. КрасГАУ. 2014. № 6. С. 80–93. Reshetnikova T.V., Zyryanova A.A., Vedrova E.F. The Organic Substance Transformation of the Forest Ground Litter (Experimental Research). *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2014, no. 6, pp. 80–93.

12. Сорокин Н.Д., Сорокина О.А. Изменение биологического состояния старопахотных почв под влиянием сосняков разного возраста (Среднее Приангарье) // Успехи современной биологии. 2008. Т. 128, № 2. С. 171–179. Sorokin N.D., Sorokina O.A. Changes in the Biological State of Old Plow Soils under the Influence of Pine Forests of Different Age (the Middle Angara River Basin). *Uspekhi sovremennoi biologii* [Biology Bulletin Reviews], 2008, vol. 128, no. 2, pp. 171–179.

13. Степанова О.И., Просьянников В.И., Клевлина Т.П. Справочник агрохимика Кемеровской области. Кемерово: Практика, 2018. 228 с. Stepanova O.I., Prosyannikov V.I., Klevlina T.P. *Handbook of Agricultural Chemist of the Kemerovo Region*. Kemerovo, Praktika Publ., 2018. 228 p.

14. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: науч.-метод. пособие. Н. Новгород: НГСХА, 2012. 64 с. Titova V.I., Kozlov A.V. *Methods for Assessing the Functioning of Soil Microbiocenosis Involved in the Transformation of Organic Matter*. Nizhny Novgorod, NNAА Publ., 2012. 64 p.

15. Турусов В.И., Гармашов В.М., Дьячкова Т.И. Ферментативная активность чернозема обыкновенного в различных севооборотах при разных способах обработки почвы // Агрохимия. 2012. № 9. С. 21–25. Turusov V.I., Garmachov V.M., Diachkova T.I. Enzymatic Activity of Ordinary Chernozem under Different Crop Rotations and Different Tillage Practices. *Agrohimia* [Eurasian Soil Science], 2012, no. 9, pp. 21–25.

16. Уфимцев В.И. Естественное возобновление и семеношение сосновых насаждений на отвалах Кузбасса // Сиб. лесн. журн. 2016. № 6. С. 84–93. Ufimtsev V.I. Natural Regeneration and Seed Production of Pine Stands on the Dumps of Coal Mining Industry in Kuzbass. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2016, no. 6, pp. 84–93. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20160608>

17. Уфимцев В.И., Беланов И.П., Бочаров Д.А. Зонирование фитогенных полей деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на участках лесной рекультивации Кедровского угольного разреза // Вестн. КемГУ. 2015. № 1-2(61). С. 44–48. Ufimtsev V.I., Belanov I.P., Bocharov D.A. Zoning of Phytogeneous Fields of the Common Pine (*Pinus sylvestris* L.) Trees Growing on Reforestation Sites of Kedrovsky Coal Mine. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Kemerovo State University], 2015, no. 1-2(61), pp. 44–48.

18. Уфимцев В.И., Стрельникова Т.О., Куприянов О.А. Структура живого напочвенного покрова в сосняках на участках рекультивации Кузбасса // Вестн. ТГУ. Биология. 2018. № 44. С. 36–58. Ufimtsev V.I., Strelnikova T.O., Kupriyanov O.A. Structure of the Living Ground Cover in Pine Forests on Dumps of Kuzbass. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2018, no. 44, pp. 36–58. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/44/3>

19. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 192 с. Khaziyev F.Kh. *Methods of Soil Enzymology*. Moscow, Nauka Publ., 2005. 192 p.

20. Цандекова О.Л., Уфимцев В.И. Формирование подстилки пойменных лесных биогеоценозов с участием *Acer negundo* L. // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 73–81. Tsandekova O.L., Ufimtsev V.I. Formation of Floodplain Forest Biogeocenosis Litter with the Participation of *Acer negundo* L. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forest Journal], 2019, no. 3, pp. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.73>

21. Cotrufo F.M., Soong J.L., Horton A.J., Campbell E.E., Haddix M.L., Wall D.H., Parton W.J. Formation of Soil Organic Matter via Biochemical and Physical Pathways of Litter Mass Loss. *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, iss. 10, pp. 776–779. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2520>

- 
22. Grabherr G. Biodiversity in Mountain Forests. *Forest in Sustainable Mountain Development*. New York, CABI, 2000, pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.1079/9780851994468.0028>
23. Kaar E. Coniferous Trees on Exhausted Oil-Shale Opencast Mines. *Forestry Studies*, 2002, vol. 36, pp. 120–125.
24. Kiikkilä V., Kitunen V., Spetz P., Smolander A. Characterization of Dissolved Organic Matter in Decomposing Norway Spruce and Silver Birch Litter. *European Journal of Soil Science*, 2012, vol. 63, iss. 4, pp. 476–486. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01457.x>
25. Lyons A. Pines Do not Damage Soils. *Private Forests Tasmania*. 2001, pp. 1–4.
26. Rhoades C.C. Single-Tree Influences on Soil Properties in Agroforestry: Lessons from Natural Forest and Savanna Ecosystems. *Agroforestry Systems*, 1997, vol. 35, iss. 1, pp. 71–94. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02345330>
27. Ufimtsev V.I., Belanov I.P., Kupriyanov O.A. Ecological-Cenotic Role of Phyto-genous Fields of Scots Pine on Coal Dumps. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, vol. 9, iss. 1, pp. 140–149. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425516010169>
28. Yashin I.M., Vasenev I.I., Valentini R., Petukhova A.A., Kogut L.P. Studies of the Influence of Soil Biogenic Acidity on Podzol Formation. *Izvestiya TSKhA* [Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy], 2013, iss. S, pp. 180–196.



УДК 629.1.032.001

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-132-145

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ КОЛЕИ ЛЕСНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

**Р.Ю. Добрецов<sup>1</sup>**, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [H-2530-2019](https://orcid.org/0000-0002-3827-0220)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>*

**С.Б. Добрецова<sup>1</sup>**, *ассистент*; *ResearcherID: [AEF-4221-2022](https://orcid.org/0000-0002-8509-2105)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8509-2105>*

**С.А. Войнаш<sup>2</sup>**, *инж.*; *ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>*

**В.А. Соколова<sup>3</sup>**, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; e-mail: dr-idro@yandex.ru, sdobretsova@mail.ru

<sup>2</sup>ООО «ПРО ФЕРРУМ», ул. 1-я Красноармейская, д. 1, Санкт-Петербург, Россия, 198005; e-mail: sergey\_voi@mail.ru

<sup>3</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: sokolova\_vika@inbox.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 28.01.21 / Принята к печати 18.04.21

**Аннотация.** Рассмотрено влияние внешних сил, действующих на шасси гусеничной машины и участвующих в перераспределении нормальных реакций на опорной поверхности движителя. При систематической эксплуатации лесозаготовительных и лесотранспортных гусеничных машин могут возникать условия, когда только часть опорной поверхности движителя передает нормальные и касательные реакции. В сочетании с «очаговой» передачей нормальных нагрузок, характеризующейся локальными максимумами нагрузки в области опорных катков, рассматриваемый эффект ведет к увеличению перегрузок, а также нормальной и касательной деформаций почвогрунта. В фундаментальных работах по теории движения гусеничных машин этот эффект практически не рассматривается, однако известны результаты наблюдений за ним и примеры его математического описания в смежной области – теории движения транспортных машин. Цель работы – предложить математическую модель, которая позволит оценивать глубину колеи гусеничной машины, прогнозировать энергозатраты в случае ее движения по деформируемым лесным почвогрунтам, учитывая эффект недоиспользования длины опорной поверхности гусеницы при контакте с почвогрунтом. Объектами исследования являются шасси скиддеров, форвардеров и харвестеров, созданных на базе гусеничных тракторов, а также шасси транспортеров-болотоходов и других транспортных и транспортно-технологических машин, используемых в лесозаготовительной и лесотранспортной промышленности. Сформулированы условия, при которых эпюра нормальных реакций под гусеницей приобретает форму треугольника и не захватывает опорную поверхность целиком. Предложены зависимости, позволяющие количественно оценить глубину формируемой колеи, работу при вертикальной деформации лесного

почвогрунта и относительное увеличение мощности сопротивления движению шасси в зависимости от относительной эффективной длины опорной поверхности. В качестве иллюстрации использованы результаты расчетов для связного и слабосвязного почвогрунтов. Разработанная модель применяется самостоятельно, но возможна и ее интеграция в методику расчетной оценки эксплуатационных параметров шасси машин.

**Для цитирования:** Добрецов Р.Ю., Добрецова С.Б., Войнаш С.А., Соколова В.А. Математическая модель формирования глубины колеи лесной гусеничной машины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 132–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-132-145

**Ключевые слова:** гусеничный движитель, деформируемый грунт, трелевочный трактор, скиддер, форвардер, нагрузка, осадка.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE TRACK DEPTH FORMATION OF A FORESTRY TRACKED VEHICLE

**Roman Yu. Dobretsov**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2530-2019](https://orcid.org/0000-0002-3827-0220),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3827-0220>

**Svetlana B. Dobretsova**<sup>1</sup>, Assistant; ResearcherID: [AEF-4221-2022](https://orcid.org/0000-0002-8509-2105),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8509-2105>

**Sergey A. Voinash**<sup>2</sup>, Engineer; ResearcherID: [AAK-2987-2020](https://orcid.org/0000-0001-5239-9883),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-9883>

**Viktoriia A. Sokolova**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAK-6062-2020](https://orcid.org/0000-0001-6880-445X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, ul. Politekhnikeskaya, 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; e-mail: dr-idpo@yandex.ru, sdobretsova@mail.ru

<sup>2</sup>ООО “PRO FERRUM”, ul. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1, Saint Petersburg, 198005, Russian Federation; e-mail: sergey\_voi@mail.ru

<sup>3</sup>Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: sokolova\_vika@inbox.ru

---

Original article / Received on January 28, 2021 / Accepted on April 18, 2021

---

**Abstract.** The paper considers the effect of external forces acting on the tracked vehicle chassis and participating in the redistribution of normal reactions on the bearing surface of the continuous track. In the systematic operation of logging and forestry tracked vehicles, conditions may arise when only a part of the bearing surface of the continuous track transmits normal and tangential reactions. In combination with the focus transmission of normal loads, characterized by local maximum loads in the area of supporting rollers, the effect under consideration leads to an increase in overloads, as well as normal and tangential deformations of the soil. The fundamental works on the theory of motion of tracked vehicles practically do not consider this effect, but the results of observations on them and examples of its mathematical description in the related field, the theory of motion of transport vehicles, are known. The research purpose is to propose a mathematical model to estimate the track depth of a tracked vehicle, to predict the energy consumption in case of its motion on deformed forest soils, taking into account the effect of underutilization of the track support surface length in contact with the ground. The objects of research are the chassis of skidders, forwarders and harvesters based on tracked tractors, as well as the chassis of transporters-swamp buggies and other transport and transport technology machines used in logging and timber transportation industry. Conditions under which the epure of normal reactions under the track takes the form of a triangle and does not capture the bearing surface as a whole are formulated. Dependencies

have been proposed to quantify the track depth to be formed, the value of work at the vertical deformation of the forest floor and the relative increase in the power of resistance to the motion of the chassis, depending on the relative effective length of the bearing surface. The results of calculations for cohesive and weakly cohesive soils are used as an illustration. The developed model is used independently; however, its integration into the method of the calculated estimation of the operating parameters of machine chassis is also possible.

**For citation:** Dobretsov R.Yu., Dobretsova S.B., Voinash S.A., Sokolova V.A. Mathematical Model of the Track Depth Formation of a Forestry Tracked Vehicle. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp.132–145. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-132-145

*Keywords:* continuous track, deformed soil, trail tractor, skidder, forwarder, load, draught.

### *Введение*

Гусеничное шасси широко используется в лесозаготовительной промышленности и является базой при создании скиддеров, форвардеров, харвестеров и других специальных машин [20]. Кроме того, оно достаточно часто применяется для промышленных тракторов, гусеничных транспортеров-болотоходов и другой техники.

Для Северо-Западного региона России гусеничное шасси обычно предпочтительнее колесного типа по причине его более высокой проходимости и лучших тягово-сцепных свойств. Статистические данные эксплуатации трелевочных тракторов (например, работа [4]) показывают, что самопередвижение без полезной нагрузки (холостой ход) занимает до 40 % рабочего времени этих машин, в остальное время трактор движется, находясь преимущественно под действием вертикальной и продольной составляющих внешней силы, создаваемой трелевочной пачкой.

При работе гусеничного движителя на опорной поверхности обнаруживаются группы траков, располагающихся вблизи опорных катков и участвующих в передаче вертикальных и продольных сил, – активные участки опорной поверхности. Описание эффекта приводится, например, в статье [15].

Внешнюю силу, действующую на машину, можно разложить на три составляющие. Составляющая, действующая в поперечной плоскости, перераспределяет нормальные реакции между бортами. Составляющие, действующие в плоскости, перпендикулярной опорной поверхности и проходящей через ось продольной симметрии машины, – между катками по бортам. Таким образом, при эксплуатации техники может сложиться ситуация, когда передние катки разгружаются от нормальной реакции [16, 22, 23].

В традиционных работах, основанных на эмпирических данных (исследования А.Р. Рииса и Б. Ганамото – основные результаты приведены в монографии [5]; С.В. Дорогина [3, 13] и др.), а также использующих детерминированное описание процесса взаимодействия гусеницы с полотном пути [1, 8, 14, 15, 18, 19, 21 и др.], указанная специфика не учитывается.

Локализация передачи нагрузок обуславливает появление пиков давления [6, 15, 17], что наряду с ухудшением ряда эксплуатационных свойств усиливает разрушение лесного почвогрунта и колеобразование.

Изучение научной литературы о влиянии веса колесных и гусеничных машин на уплотнение почвогрунтов и образование колеи [25–29, 31–37, 40], а

также о прогнозировании сопротивления движению машин [30, 38] показывает, что чаще всего применяются модели, основанные на статистическом описании свойств поверхности движения. Такой подход полностью оправдан, например, для сложных грунтовых условий, возникающих при армировании лесного почвогрунта корнями деревьев, наличии препятствий в виде пней, валунов и др., однако, как правило, не позволяет детально проанализировать взаимодействие движителя и опорного основания. Для этого более пригодны детерминированные модели, требующие некоторого сужения границ применимости, налагаемых базовыми гипотезами. Отдельное направление представляют собой модели, базирующиеся на методе конечных элементов. Эти методы подразумевают использование существенно больших объемов информации о шасси и достаточно сложных программных средств.

В представленной работе рассматривается детерминированная модель для анализа влияния внешней силы на взаимодействие гусеничного движителя и полотна пути преимущественно подготовленных (песчаных, глинистых) трасс движения. Такой подход расширяет возможности исследователей и позволяет оперативно оценивать воздействие вносимых в конструкцию шасси изменений на эксплуатационные характеристики машин, не дожидаясь накопления статистических данных, что определяет актуальность разработки, совершенствования и применения подобных математических моделей.

Цель исследования – формирование математической модели, позволяющей прогнозировать глубину колеи гусеничной машины и оценивать затраты мощности на движение по деформируемым лесным почвогрунтам с учетом эффекта недоиспользования длины опорной поверхности гусеницы при передаче вертикальных и продольных реакций. В дальнейшем такая модель может найти самостоятельное применение или использоваться в составе более сложных комплексов оценки эксплуатационных характеристик шасси машин.

*Объекты исследования* – шасси лесозаготовительных и лесотранспортных гусеничных машин, используемых в лесозаготовительной отрасли (скиддеров, форвардеров и харвестеров на базе гусеничного трактора), транспортеров-болотоходов и других транспортных и транспортно-технологических машин.

*Методы* – базовые подходы теории гусеничных машин; расчетные методы, используемые в механике грунтов; инженерный эксперимент.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В теории движения гусеничных машин обычно принимается допущение, что вертикальные реакции равномерно распределены по опорной поверхности, а их эпюра имеет форму прямоугольника [11]. Центр тяжести находится в геометрическом центре шасси.

Приложение к ведущему колесу силы тяги изменяет форму эпюры. Считается, что она становится трапециевидной (рис. 1, *a*), сосредоточенная нормальная реакция  $Z$  смещается на величину  $x$  относительно линии действия веса машины (появляется продольное смещение центра давления). Внешние силы – сопротивление внешней среды, вес груза, нагрузка на сцепном устройстве и т. д. – усиливают деформацию эпюры.

Движение гусеничной машины – транспортных гусеничных машин и тракторов – под действием произвольной внешней силы рассматривается в большинстве работ именно для прямоугольной и трапециевидной форм эпюры нормальных реакций. Значительное влияние внешних сил и приобретение вследствие этого эпюрой формы треугольника (рис. 1, б) [7, 14, 22, 24, 39] упоминается как «нерабочий» вариант и не анализируется. Вместе с тем практика использования гусеничных машин показывает, что значительные продольные внешние силы возникают часто и могут действовать на машину длительное время (буксировка прицепов, трелевка, работа траншейного агрегата и др., статистика режимов работы трелевочных тракторов приведена, например, в монографии [4]).

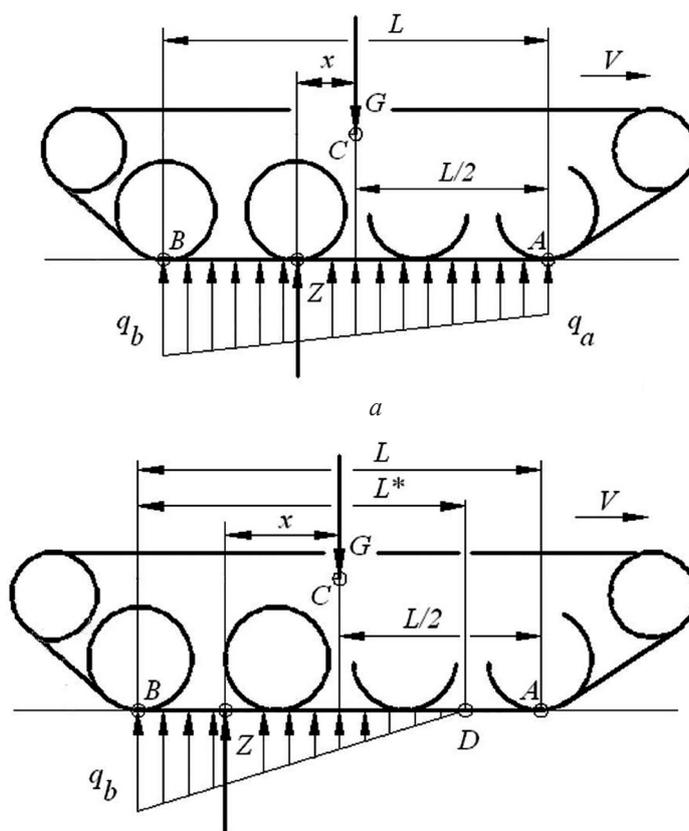


Рис. 1. Деформация эпюры нормальных реакций: а – трапециевидная форма; б – треугольная форма [7]

Fig. 1. Deformation of the epure of normal reactions: а – trapezoidal shape; б – triangular shape [7]

Из рис. 1, б видно, что при достижении некоторых условий нагружения в передаче вертикальных и, следовательно, продольных сил вовлекается длина опорной поверхности машины не целиком:  $L^* < L$ .

«Недогруженный» участок ветви, который может захватить и траки под передним катком, создает дополнительное сопротивление движению, но полезной работы совершает пренебрежимо мало. Для реализации силы тяги необходима достаточная вертикальная нагрузка, а она в данном случае возникает в основном за счет неподрессоренных масс подвески переднего катка.

Представленные в работе [22] результаты экспериментов над шасси тракторов показывают, что эффект частичной разгрузки опорной поверхности от вертикальных реакций начинает проявляться при значении  $|x| \geq L/6$ . В традиционных источниках и работах по теории трактора далее эта проблема не рассматривается. В литературе по теории транспортных гусеничных машин данному случаю также не уделяется внимания. Теоретические выкладки по этой проблеме были приведены нами в статье [7]. Покажем, что предложенные в ней подходы распространяемы на случай гусеничного движителя трелевочного трактора.

Из научных источников (например, [14, 24]) известно соотношение  $x = \frac{L}{6} \cdot \frac{q_b - q_a}{q_b + q_a}$ . В данной зависимости  $q_a$  и  $q_b$  – нормальное давление в точках  $A$  и  $B$  на краях опорной поверхности;  $L = |AB|$  (см., например, статью [7]).

При значениях  $x = \pm L/6$  из соблюдения условия  $q_b + q_a = q_b - q_a$  следует, что  $q_a = 0$ .

Продольное смещение центров давления гусениц можно оценить, не используя  $q_a$  и  $q_b$  (см., например, публикации [14, 24]):

$$x = \frac{fZ r_{\text{в.к}}/\eta + P_x(h + r_{\text{в.к}}/\eta) + P_z x_p}{Z}.$$

В соответствии с цитируемыми первоисточниками, приводим расшифровку обозначений:  $f$  – коэффициент сопротивления качению;  $r_{\text{в.к}}$  – радиус ведущего колеса;  $\eta$  – КПД ходовой системы;  $P_x$  и  $P_z$  – горизонтальная и вертикальная составляющие внешней силы;  $h$  и  $x_p$  – вертикальная и горизонтальная координаты точки приложения внешней силы соответственно.

Необходимо указать, что для представленного на рис. 1 случая соблюдаются условия  $P_x = 0$  и  $P_z = G$ , где  $G$  – вес машины.

По расчетной схеме на рис. 1,  $b$  рассмотрим равновесие опорной поверхности машины относительно точки  $B$ :

$$M_b = \frac{1}{2}(2b_r L^* q_b) \frac{L^*}{3} = \frac{b_r q_b (L^*)^2}{3}.$$

где  $b_r$  – ширина гусеницы.

Момент реакции опоры при  $Z = 2 \cdot \frac{1}{2} b_r L^* q_b = b L^* q_b$ :

$$M_b = Z(L/2 - x) = b_r q_b L^* (L/2 - x).$$

Таким образом,  $b_r q_b L^* \left(\frac{L}{2} - x\right) = \frac{b_r q_b (L^*)^2}{3}$ .

Используем понятие относительного продольного смещения центра давления  $x_0 = X/L$ , тогда при  $|x_0| \in [1/6, 1/2)$  выразим:

$$L^* = 3L(0,5 - x_0) \text{ или } L^*/L = 3(0,5 - x_0).$$

По аналогии с [7] обозначим относительную эффективную длину опорной поверхности как  $L^*/L$ .

Известно, что вертикальная нагрузка и осадка грунта в механике грунтов связаны соотношением

$$q(x) = k[z(x)]^n,$$

где  $q(x)$  – нормальное давление;  $k$ ,  $n$  – эмпирические коэффициенты;  $z$  – нормальная осадка.

Чтобы корректно использовать данную зависимость, важно применять подходы, принятые в первоисточниках при определении значений эмпирических коэффициентов в этом выражении. Обратим внимание, что в работе [5] вводится соотношение  $k = k_c + bk_\phi$ , а в [2] –  $k = k_c + k_\phi/b$ . Согласно первоисточникам,  $k_c$ ,  $k_\phi$  – коэффициенты, характеризующие осадку грунта при приложении вертикальной нагрузки на штамп шириной  $b$  и определяемые опытным путем. Ширина штампа для случая гусеничной машины принимается равной ширине гусеницы:  $b = b_r$ .

Эффект многократного нагружения при последовательном прохождении опорных катков определяется, по данным работы [5], осадкой, реализованной под наиболее нагруженным опорным катком:  $z_{\max} = \sqrt[n]{q_{\max}/k}$ .

Рис. 2. иллюстрирует основные результаты расчетов для трактора массой 8000 кг при ширине гусеницы 300 мм и длине опорной поверхности  $L = 3066$  мм при  $L^*/L = 0,7$ .

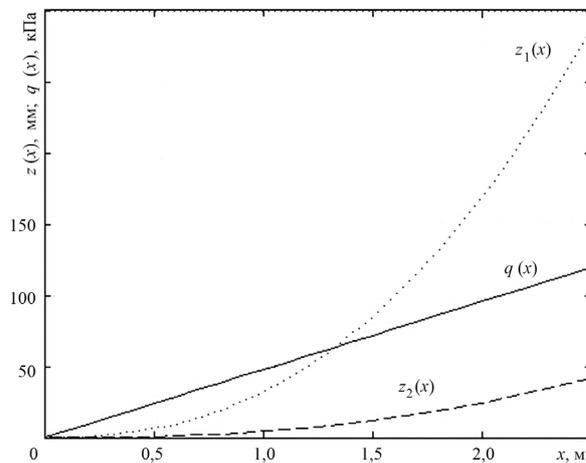


Рис. 2. Изменение расчетных значений нормального давления и осадки на рассматриваемых грунтах при соотношении  $L^*/L = 0,7$  [7]

Fig. 2. Change in design values of normal pressure and sedimentation on the considered soils at the ratio  $L^*/L = 0.7$  [7]

Для соотнесимости результатов с данными, полученными для транспортной машины [7], использованы следующие параметры почвогрунта [1]:

грунт 1 (слабосвязный): песчаный,  $k_c \approx 2,3$  кг/см $^{1+n}$ ;  $k_\phi \approx 0,2$  кг/см $^{2+n}$ ;  $n \approx 0,42$ ; предельная несущая способность  $p_0 \approx 120$  кПа;

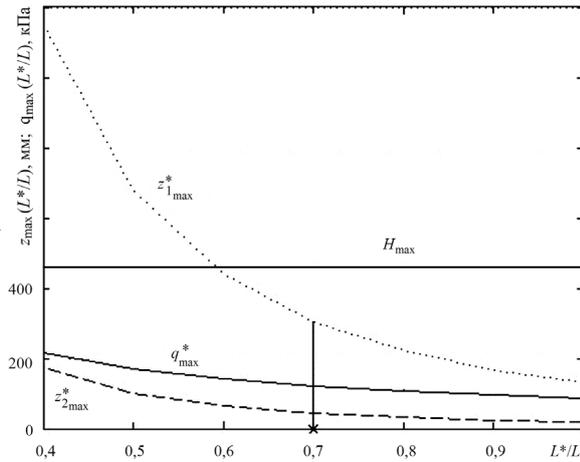
грунт 2 (связный): глинистый  $k_c \approx 1,6$  кг/см $^{1+n}$ ;  $k_\phi \approx 0,6$  кг/см $^{2+n}$ ;  $n \approx 0,41$ ;  $p_0 \approx 220$  кПа.

Закономерность изменения  $q_{\max}^*$  и  $z_{\max}^*$  на отрезке  $L^*/L \in [0,4; 1]$  показана на рис. 3. Результаты свидетельствуют, что для слабосвязного почвогрунта предельная несущая способность достигается при  $L^*/L \approx 0,7$ . В этой ситуации шасси практически теряет подвижность и начинает «закапываться» в грунт. Для дальнейшего использования расчетной модели потребуется ее модификация. Погружение шасси в деформируемый грунт для большинства конструкций ограничено дорожным просветом.

Используя соотношения из работ [14, 24], для трапецевидной эпюры нормальных реакций можно записать:

$$q_{\max} = q_b = \frac{G(1 + 6x_0)}{2b_r L}$$

Рис. 3. Расчетное давление и расчетная глубина колеи на рассматриваемых грунтах  
 Fig. 3. Design pressure and design track depth on the considered soils



Для треугольной формы эпюры –

$$q_{\max}^* = \frac{G}{b_r L^*}.$$

Тогда выполняется соотношение, установленное в работе [7]:

$$\frac{z_{\max}^*}{z_{\max}^*} = \sqrt[n]{\frac{q_{\max}^*}{q_{\max}^*}} = \sqrt[n]{\frac{L^*}{2L}(1 + 6x_0)}.$$

Изменение формы эпюры давлений (от трапециевидной к треугольной) не дает «катастрофических» эффектов. Однако с уменьшением значения  $L^*/L$  расчетная глубина колеи увеличится, что будет сопровождаться, например, ростом энергозатрат на движение шасси.

Как в [7] оценим работу на нормальную деформацию лесного почвогрунта на площади  $dx \times 2b_r$ :

$$dA = 2b_r q(x) z(x) dx.$$

Для трапециевидной эпюры можно записать:

$$z(x) = \sqrt[n]{q(x)/k};$$

для треугольной –

$$q(x) = 2q_{\max}^* x/L^*.$$

Оценка производится при равномерном распределении вертикальной нагрузки по гусеницам:  $b = 2b_r$ .

Энергозатраты (работа) на вертикальное прессование почвогрунта при треугольной форме эпюры давлений оцениваются с помощью выражения

$$A^* = 2b_r \max\{q(x)\} \max\{z(x)\}.$$

Как в [7] записываем:

$$A^* = \frac{2G^{\frac{1+n}{n}}}{(L^*)^{\frac{1+n}{n}} \sqrt[n]{b_r k}}.$$

Предполагаем, что движение машины является прямолинейным и равномерным. Задаем скорость движения  $V$ . Тогда мощность на вертикальное пресс-

сование грунта (колеобразование) за время  $\Delta t = L^*/V$  может быть оценена по зависимости, не отличающейся от предложенной для транспортных машин [7]:

$$N^* = \frac{A^*}{t} = \frac{2VG^{\frac{1+n}{n}}}{(L^*)^{\frac{1+2n}{n}} \sqrt[n]{b_r k}}, \text{ при } |x_0| \in [1/6, 1/2).$$

Отметим, что условия эксплуатации лесных машин заметно отличаются от условий эксплуатации транспортных машин.

Учитывая статистику режимов работы [4], оценим затраты мощности на образование колеи у трелевочного трактора. На рис. 4 приведены результаты расчета для скорости прямолинейного движения 2 м/с. Потери мощности в силовой передаче и ходовой части не учитывались.

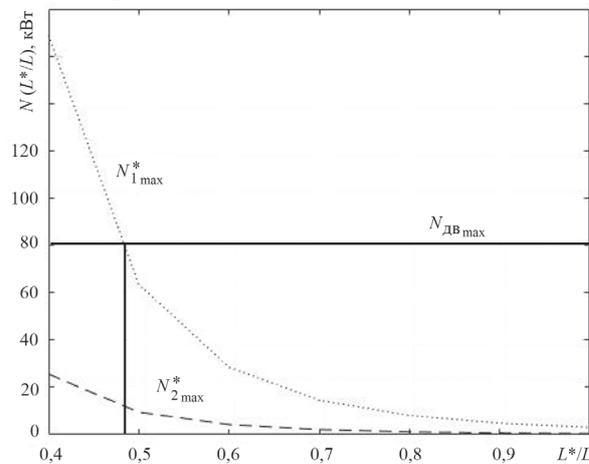


Рис. 4. Затраты мощности и колеобразование на рассматриваемых грунтах ( $N_{\text{дв max}}$  – максимальная мощность двигателя)

Fig. 4. Power consumption and tracking on the considered soils ( $N_{\text{дв max}}$  – maximum engine power)

По аналогии со случаем транспортной машины применима зависимость, позволяющая оценить относительное изменение мощности на вертикальное прессование лесного почвогрунта в функции параметра  $L^*/L$  (на рис. 5 представлены результаты расчетов для связного почвогрунта):

$$N^*/N = (L^*/L)^{\frac{1+2n}{n}} \geq 1, \text{ при } |x_0| \in [1/6, 1/2).$$

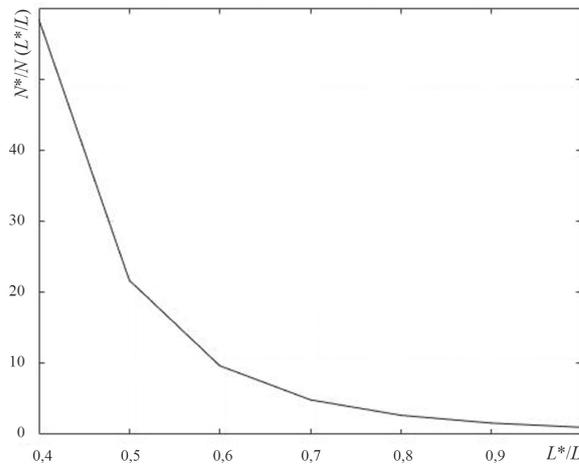


Рис. 5. Изменение относительной мощности, затрачиваемой на образование колеи, в функции  $N^*/N(L^*/L)$  при  $L^*/L \in [0,4; 1]$

Fig. 5. Change in the relative power expended on tracking, as a function of  $N^*/N(L^*/L)$  when  $L^*/L \in [0,4; 1]$

На связных грунтах при усредненном коэффициенте сопротивления движению  $f = 0,078$  мощность сопротивления движению рассматриваемой машины составляет до 40 кВт.

Таким образом, значение  $L^*/L$  оказывает существенное влияние на затраты мощности при передвижении гусеничной машины. Важно использовать данный параметр, например, в моделях комплексной оценки энергетической эффективности шасси гусеничной машины [9, 12].

Помимо условий образования колеи треугольная эпюра нормальных реакций изменит и условия формирования сил тяги на поверхности движителя. На участке опорной поверхности, «недогруженном» нормальными реакциями, ожидается проявление негативных эффектов, связанных со звенчатостью гусеницы [3, 8, 13, 18], а на «перегруженном» – с буксованием.

### Заключение

Итак, относительная эффективная длина опорной поверхности – параметр, характеризующий энергетическую эффективность гусеничного шасси. Выполнение условия «относительная эффективная длина опорной поверхности  $\rightarrow 1$ » следует обеспечивать на этапах проектирования и эксплуатации машин.

Значение относительной эффективной длины опорной поверхности определено действующими на гусеничное шасси при эксплуатации силами. Вместе с тем передача нормальных и, следовательно, касательных реакций для большинства конструкций гусеничных движителей локализована вблизи опорных катков. Даже при «недоиспользовании» площади опорной поверхности такой эффект будет сохраняться.

Традиционная теория движения гусеничных машин не рассматривает влияние относительной эффективной длины опорной поверхности на момент сопротивления повороту и требуемые силы тяги на гусеницах.

Таким образом, можно резюмировать следующие положения:

1. Глубина колеи на деформируемых грунтах и связанные с процессом ее образования энергозатраты существенно зависят от длины части опорной поверхности движителя, непосредственно участвующей в передаче нагрузок.

2. Предложенный подход позволяет оценить влияние условий нагружения машины при эксплуатации на процесс образования колеи с учетом конструктивных параметров движителя.

3. Представляет интерес построение модели, учитывающей влияние балласта на процесс образования колеи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю. Методика расчета нормальных давлений на опорной поверхности гусеницы транспортной машины // Науч.-техн. вед. СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2011. № 3. С. 103–108. Avotin E.V., Dobretsov R.Yu. Methods for Calculation of Normal Pressure, Acting on the Ground Contacting Area of the Track of the Transport Vehicle. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye* [Materials Science. Power Engineering], 2011, no. 3, pp. 103–108.

2. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 230 с. Ageykin Ya.S. *Passing Ability of Vehicles*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 230 p.
3. Акулов С.В., Дорогин С.В., Степанов В.Н. О сдвиге гусениц при прямолинейном движении танка // Вестн. бронетанковой техники. 1959. № 2. С. 48–52. Akulov S.V., Dorogin S.V., Stepanov V.N. On the Displacement of Tracks during Rectilinear Movement of a Tank. *Vestnik bronetankovoy tekhniki*, 1959, no. 2, pp. 48–52.
4. Анисимов Г.М., Кочнев А.М. Основные направления повышения эксплуатационной эффективности гусеничных трелевочных тракторов. СПб.: Политехн. ун-т, 2007. 455 с. Anisimov G.M., Kochnev A.M. *Main Directions of Increasing the Operational Efficiency of Tracked Skidder*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2007. 455 p.
5. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность - машина: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1973. 520 с. Becker M.G. *Introduction to the Theory of Terrain-Machine Systems*. Transl. from English. Moscow, Mashinostroyeniye, 1973. 520 p.
6. Веселов Н.В. Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет: моногр. Н. Новгород: РИ «Бегемот», 2010. 320 с. Veselov N.V. *All-Terrain Transport and Technological Vehicles. Construction, Engineering and Calculation*: Monograph. Nizhny Novgorod, RI "Begemot" Publ., 2010. 320 p.
7. Галышев Ю.В., Добрецов Р.Ю. Эффективность использования опорной поверхности гусеничного движителя при передаче нормальных нагрузок // Науч.-техн. вед. СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2013. № 3(178). С. 272–278. Galishev Yu.V., Dobretsov R.Yu. Efficiency of the Usage of the Ground Contact Area of a Caterpillar Drive under Conditions of Transmitting the Normal Loads. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye* [Materials Science. Power Engineering], 2013, no. 3(178), pp. 272–278.
8. Добрецов Р.Ю. Особенности работы гусеничного движителя в области малых удельных сил тяги // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2009. № 6. С. 25–31. Dobretsov R.Yu. Features of a Continuous Track in the Area of Low Specific Traction Forces. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2009, no. 6, pp. 25–31.
9. Добрецов Р.Ю. Объективная оценка технических характеристик шасси транспортных гусеничных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2011. № 2. С. 19–23. Dobretsov R.Yu. Objective Assessment of Technical Characteristics of the Transport Caterpillar Vehicles' Chassis. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 2011, no. 2, pp. 19–23.
10. Добрецов Р.Ю. Модель взаимодействия гусеницы с грунтом при значительных продольных смещениях центра давления // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение: тр. XIX Всерос. науч.-практ. конф. Т. 3. / под ред. В.А. Петрова, М.В. Сильникова, А.М. Сазыкина. М.: Рос. акад. ракет. и артиллер. наук, 2016. С. 96–102. Dobretsov R.Yu. Model of Interaction of a Caterpillar with the Ground at Significant Longitudinal Displacements of the Pressure Center. *Actual Problems of Protection and Safety. Armored Vehicles and Weapons. Proceedings of the XIX Scientific and Practical Conference*. Vol. 3. Ed. by V.A. Petrov, M.V. Sil'nikov, A.M. Sazykin. Moscow, RARAN Publ., 2016, pp. 96–102.
11. Добрецов Р.Ю., Семёнов А.Г. О снижении перепадов нагрузки на опорное основание при качении гусеничного движителя // Экология и промышленность России. 2009. № 5. С. 46–49. Dobretsov R.Yu. The Ways of Reduction of Ecological Danger Due to Interaction of Vehicles Caterpillar Movers with Soilsю *Ekologia i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2009, no. 5, pp. 46–49.
12. Добрецова С.Б., Добрецов Р.Ю. О выборе метода построения обобщенного отклика в задаче оценки энергоэффективности шасси транспортной гусеничной машины // Транспортные и транспортно-технологические системы. Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. С. 99–103. Dobretsova S.B., Dobretsov R.Yu. On the Select Build Method of the Gen-

eralized Response in the Task of Assessing the Efficiency the Chassis of the Tracked Vehicle. *Transport and Transport Technology Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Tyumen, TSOGU Publ., 2015, pp. 99–103.

13. Дорогин С.В., Карнаух В.П. Влияние размещения грунтозацепов на сопротивление движению ВГМ // Вестн. бронетанковой техники. 1989. № 11. С. 34–45. Dorogin S.V., Karnaukh V.P. Influence of the Placement of Grousers on the Resistance to Motion of Tracked Military Vehicles (VGM). *Vestnik bronetankovoy tekhniki*, 1989, no. 11, pp. 34–45.

14. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с. Zabavnikov N.A. Fundamentals of the Theory of Transport Tracked Vehicles. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 448 p.

15. Красеньков В.И., Ловцов Ю.И., Быко-Янко А.В. Нормальные давления под гусеницей // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1982. № 390. С. 3–12. Krasnen'kov V.I., Lovtsov Yu.I., Byko-Yanko A.V. Normal Pressures under the Track. *Trudy MVTU imeni N.E. Baumana*, 1982, no. 390, pp. 3–12.

16. Ксеневиц И.П., Гуськов В.В., Бочаров Н.Ф., Атаманов Ю.Е., Тарасик В.П., Разумовский М.А. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет / под общ. ред. И.П. Ксеневица. М.: Машиностроение, 1991. 544 с. Ksenevich I.P., Gus'kov V.V., Bocharov N.F., Atamanov Yu.E., Tarasik V.P., Razumovskiy M.A. *Tractors. Design, Construction and Calculation*. Ed. by I.P. Ksenevich. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1991. 544 p.

17. Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. М.: Машиностроение, 1993. 288 с. Kulyashov A.P., Kolotilin V.E. *Environmental Friendliness of Transport and Technological Vehicles*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1993. 288 p.

18. Мазур А.И., Крюков В.В., Фадеев И.Ф. Механизм взаимодействия гусениц с грунтом // Вестн. бронетанковой техники. 1983. № 3. С. 52–55. Mazur A.I., Kryukov V.V., Fadeyev I.F. Mechanism of Interaction between Tracks and Ground. *Vestnik bronetankovoy tekhniki*, 1983, no. 3, pp. 52–55.

19. Носов С.В. Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания: моногр. Липецк: ЛПГУ, 2006. 228 с. Nosov S.V. *Mobile Power Facilities: The Choice of Parameters and Operating Modes through the Rheological Properties of the Support Base*: Monograph. Lipetsk, LSTU Publ., 2006. 228 p.

20. Пятакин В.И., 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. Технология и машины лесосечных работ / под ред. В.И. Пятакина. СПб.: СПбГЛТУ, 2012. 362 с. Patyakin V.I., 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 of Logging Operations*. Ed. by V.I. Pyatyakin. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2012. 362 p.

21. Расчет сопротивления движению гусеничной машины // Зарубежная военная техника. Сер. III: Бронетанковая техника и вооружение. 1977. Вып. 1. С. 25–27. Calculation of the Motion Resistance of a Tracked Vehicle. *Zarubezhnaya voyennaya tekhnika. Ser. III: Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye*, 1977, iss. 1, pp. 25–27.

22. Скотников В.А., Маценский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / под ред. В.А. Скотникова. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с. Skotnikov V.A., Mashchenskiy A.A., Solonskiy A.S. *Fundamentals of Theory and Calculation of a Tractor and a Vehicle*. Ed. by V.A. Skotnikov. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 383 p.

23. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 752 с. Sharipov V.M. *Design and Calculation of Tractors*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2009. 752 p.

24. Шеломов В.Б. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Тяговый расчет криволинейного движения. СПб.: Политехн. ун-т, 2013. 90 с. Shelomov V.B. *Theory of Motion of Multipurpose Tracked and Wheeled Vehicles. Traction Calculation of Curvilinear Motion*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2013. 90 p.
25. Björheden R. *Rutting and Vibration Levels of the On Track Concept Forwarder on Standardised Test Tracks*. Arbetsrapport 989. Uppsala, Skogforsk, 2018. 28 p.
26. Bygdén G., Eliasson L., Wästerlund I. Rut Depth, Soil Compaction and Rolling Resistance when Using Bogie Tracks. *Journal of Terramechanics*, 2003, vol. 40, iss. 3, pp. 179–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2003.12.001>
27. Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. The Impact of Heavy Traffic on Forest Soils: A Review. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 338, pp. 124–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>
28. Edlund J., Keramati E., Servin M. A Long-Tracked Bogie Design for Forestry Machines on Soft and Rough Terrain. *Journal of Terramechanics*, 2013, vol. 50, iss. 2, pp. 73–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.02.001>
29. Gerasimov Yu., Katarov V. Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, vol. 31, iss. 1, pp. 35–45.
30. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The Way to Reduce Ecological Impact on Forest Soils Caused by Wood Skidding. *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*. Sofia, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2014, vol. 2, no. SGEM2014, pp. 501–508. DOI: <https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B32/S14.067>
31. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Stepanishcheva M. Dependence of Filtration Coefficient of Forest Soils to Its Density. *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems*. Sofia, Bulgaria, STEF92 Technology Ltd., 2014, pp. 339–344. DOI: <https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B32/S14.046>
32. Haas J., Ellhöft K.H., Schack-Kirchner H., Lang F. Using Photogrammetry to Assess Rutting Caused by a Forwarder – A Comparison of Different Tires and Bogie Tracks. *Soil and Tillage Research*, 2016, vol. 163, pp. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.008>
33. Huat B.B.K., Prasad A., Asadi A., Kazemian S. *Geotechnics of Organic Soils and Peat*. London, CRC Press, 2014. 250 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b15627>
34. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical Model for Evaluation of Tractive Performance of Forestry Machine's Wheel. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2018, vol. 18, pp. 997–1003. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/3.2/S14.127>
35. Jarkko L. *Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations*. Master of Science Thesis. Tampere, TTY, 2018. 73 p.
36. Khitrov E., Andronov A., Bogatova E., Kotenev E. Development of Recommendations on Environmental Certification of Forestry Machinery Drives. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2019, vol. 19, pp. 689–696. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S14.089>

- 
37. Khitrov E., Andronov A., Iliushenko D., Kotenev E. Comparing Approaches of Calculating Soil Pressure of Forestry Machines. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2019, vol. 19, pp. 649–655. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.2/S14.084>
38. Khitrov E., Ivanov V., Stepanishcheva M., Kochnev A. Linking the Deformation Moduli and Cone Indices of Forest and Peatland Soils. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM: Surveying Geology and Mining Ecology Management*. Sofia, Bulgaria, 2018, vol. 18, pp. 297–304. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/3.2/S13.039>
39. Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. Wiley, 2001. 528 p.
40. Wong J.Y., Huang W. “Wheels vs. Tracks” – A Fundamental Evaluation from the Traction Perspective. *Journal of Terramechanics*, 2006, vol. 43, iss. 1, pp. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.08.003>

УДК 625.852

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В СЛОЯХ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ***А.М. Боргонутдинов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.;*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>*С.Е. Рудов<sup>2</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: AAC-9563-2020,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>*И.В. Григорьев<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: S-7085-2016,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>*Д.С. Ефимов<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5684-9968**В.В. Швецова<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: AAC-3395-2021,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326><sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский просп., д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; e-mail: [burgonutdinov.albert@yandex.ru](mailto:burgonutdinov.albert@yandex.ru)<sup>2</sup>Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий просп., д. 3, К-64, Санкт-Петербург, Россия, 194064; e-mail: [89213093250@mail.ru](mailto:89213093250@mail.ru)<sup>3</sup>Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru)<sup>4</sup>Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, ул. Пушкинская, д. 111, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Россия, 346428; e-mail: [efimow.denis809@yandex.ru](mailto:efimow.denis809@yandex.ru)<sup>5</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: [viktoria.shvetsova20@mail.ru](mailto:viktoria.shvetsova20@mail.ru)

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 19.01.21 / Принята к печати 08.04.21

---

**Аннотация.** Экономическое и социальное развитие лесного комплекса страны в целом и отдельных ее регионов невозможно без постоянного совершенствования лесовозных магистралей и поддержания требуемого уровня их технического состояния. Несмотря на то, что на строительство и ремонт лесовозных магистралей выделяются значительные средства, срок службы дорог зачастую не соответствует нормативным значениям. Причиной могут быть ошибки в проектировании, связанные с отсутствием данных по теплопроводности дорожно-строительных материалов, сезонное промерзание грунтов земляного полотна. В совокупности с неудовлетворительными грунтово-гидрологическими условиями данные факторы способствуют значительным деформациям дорожной конструкции. Одна из основных проблем дорожной отрасли в настоящее время – недостаточный учет грунтово-гидрологических условий местности: они оцениваются приближенно по топографическим картам и материалам старых документов или в лучшем случае по результатам рекогносцировочных исследований. При проектировании земляного полотна грунтово-гидрологические условия являются вторичным критерием выбора площадки проведения работ, а место прокладки трассы – первичным. Этим обусловлено то, что лесовозные трассы часто прокладывают на территории, где трудно обеспечить требуемые несущую способность и морозоустойчивость дорожных конструкций. Периодически происходящие промерзания и оттаивания дорожного полотна приводят к возникновению знакопеременных напряжений, значительно ускоряющих разрушение дорожного покрытия, а иногда и основания дороги. Цель работы – изучить механизм влияния температурного режима на дорожную конструкцию. Полевые испы-

---

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

тания по измерению температуры в дорожной конструкции проводились в г. Перми на практически ровном асфальтированном участке. Представлены особенности процессов, протекающих в слоях дорожной конструкции лесовозных магистралей в период сезонного промерзания. Рассмотрены гипотезы о миграции влаги в сезоннопромерзающих грунтах, влиянии на данный процесс теплоемкости и теплопроводности дорожно-строительных материалов, а также методы моделирования процессов, протекающих в дорожной конструкции под влиянием природно-климатических условий. Получены значения температуры в дорожной конструкции, построены графики, показывающие среднюю температуру в дорожной конструкции в зависимости от времени года (для условий Пермского края). Глубокое понимание механизмов промерзания и оттаивания дорожного полотна позволяет избежать ошибок проектирования и связанных с ними значительных финансовых потерь при строительстве магистральных лесовозных дорог.

**Для цитирования:** Боргутдинов А.М., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Ефимов Д.С., Швецова В.В. Экспериментальные исследования теплового режима в слоях дорожного покрытия магистральных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>

**Ключевые слова:** лесовозные магистрали, водно-тепловой режим, лесовозные автомобильные дороги, дорожная конструкция, сезонное промерзание, зона промерзания, источники увлажнения, миграция влаги, датчики температуры.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMAL REGIME IN THE PAVEMENT LAYERS OF LONG-DISTANCE FOREST ROADS

*Albert M. Borgonutdinov<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.;*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7489-791X>*

*Sergey E. Rudov<sup>2</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-9563-2020](https://orcid.org/0000-0002-9900-0929),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9900-0929>*

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

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

*Denis S. Efimov<sup>4</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-9968>*

*Viktoriya V. Shvetsova<sup>5</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

*ResearcherID: [AAC-3395-2021](https://orcid.org/0000-0001-8566-2326), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-2326>*

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Komsomol'skiy prosp., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: [burgonutdinov.albert@yandex.ru](mailto:burgonutdinov.albert@yandex.ru)

<sup>2</sup>Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretskiy prosp., 3, K-64, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; e-mail: [89213093250@mail.ru](mailto:89213093250@mail.ru)

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

<sup>4</sup>Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, ul. Pushkinskaya, 111, Novocherkassk, 346428, Russian Federation; e-mail: [efimov.denis809@yandex.ru](mailto:efimov.denis809@yandex.ru)

<sup>5</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: [viktoria.shvetsova20@mail.ru](mailto:viktoria.shvetsova20@mail.ru)

---

**Original article** / Received on January 19, 2021 / Accepted on April 8, 2021

---

**Abstract.** Economic and social development of both the country as a whole and its individual regions is impossible without maintaining the required level of development and technical condition of the road network. This also applies directly to agricultural producers. Despite the fact that considerable funds are allocated for the construction and repair of roads, the service life of roads often does not meet the standard values. One of the reasons for the low service life of road structures are design errors related to the lack of data on the thermal conductivity of road construction materials, seasonal freezing of the roadbed, which together with unsatisfactory soil and hydrological conditions contribute to significant deformations. One of the main problems in the road industry at present is insufficient consideration of soil and hydrological conditions of the area, which are estimated approximately from topographic maps and materials of old documents or, at best, from the results of reconnaissance surveys. At the same time, it is often difficult to provide the required load-bearing capacity and frost resistance of road structures with an unsuccessfully selected, even short route, since when designing the roadbed, soil and hydrological conditions are secondary, and the choice of the route location is primary. It is well known effect when periodic freezing and thawing of the road surface leads to the appearance of alternating stresses, which significantly accelerate the destruction of the road surface and sometimes the foundation. A thorough understanding of the processes of freezing and thawing of the roadbed makes it possible to avoid design errors, and the significant financial losses associated with them, in the construction of long-distance forest roads. The article presents the features of processes occurring in the layers of road construction during seasonal freezing. Hypotheses about the processes of moisture migration in seasonally frozen soils, the influence of heat capacity and thermal conductivity of road construction materials on the course of these processes, as well as methods for modeling processes occurring in road structures under the influence of natural and climatic conditions are considered, and the results of the field experimental studies are presented.

**For citation:** Borgonutdinov A.M., Rudov S.E., Grigorev I.V., Efimov D.S., Shvetsova V.V. Experimental Studies of the Thermal Regime in the Pavement Layers of Long-Distance Forest Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 146–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-146-158

**Funding:** The research was carried out within the framework of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>

**Keywords:** long-distance forest roads, water and heat regime, forest roads, road structure, seasonal freezing, freezing zone, moisture sources, moisture migration, temperature sensors.

### *Введение*

Анализ работы дорожных покрытий в районах с сезонным промерзанием почвы показывает, что в холодные периоды года в земляном полотне и конструкции дорожной одежды происходят наибольшие разрушения и деформации, являющиеся главной причиной низкого качества автомобильных лесовозных дорог [3]. Одной из основных проблем при их строительстве становится недостаточный учет грунтово-гидрологических условий местности, которые оцениваются приближенно по топографическим картам, материалам старых документов и в лучшем случае путем рекогносцировочных исследований [5]. Изучению закономерностей водно-теплого режима дорожных конструкций посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных ученых. В нашей стране пристальное внимание на данную проблему было обращено еще в начале прошлого века. В настоящее время этот вопрос не утратил актуальность, напротив, в силу все возрастающего уровня автомобилизации, суще-

ственно выросшего среднего расстояния вывозки заготовленной древесины и стремления к повышению качества автомобильных лесовозных дорог [13, 17, 18, 20] привлекает все большее внимание исследователей.

Цель работы – изучить механизм влияния температурного режима на дорожную конструкцию.

#### *Объекты и методы исследования*

Первые попытки теоретически обосновать процессы накопления влаги в сезоннопромерзающих грунтах были предприняты еще в исследовании [1]. Также одним из первых этот вопрос рассматривал В.И. Штукенберг. Он показал, что и при отсутствии грунтовых вод наблюдается значительное накопление влаги. Ее миграция, как считал ученый, объясняется совместным влиянием молекулярно-адсорбционных и капиллярных сил (сил кристаллизации), которые воздействуют на поверхность вновь появляющихся кристаллов. Согласно исследованиям, миграция влаги происходит только за счет сил кристаллизации. Причиной притока влаги к зоне промерзания, по мнению Штукенберга, является бóльшая энергия связи молекул воды со льдом, чем с грунтом [6].

А.Ф. Лебедев экспериментальным путем доказал, что приток пленочной воды к зоне промерзания происходит и при отсутствии льда, например в талом грунте, когда из него испаряется влага [10]. Пленочная вода, согласно выводам ученого, под действием молекулярно-адсорбционных сил движется от более толстых к более тонким пленкам.

Р. Рюкли объяснил миграцию влаги силой всасывания, являющейся постоянной величиной. Исследователь вычислял степень морозостойкости через расстояние до уровня грунтовых вод. В основу определения притока влаги ученым были положены 2 гипотезы [6]: всасывающая сила грунта не зависит от температурных градиентов; к движению влаги в замерзающем грунте применим закон Дарси. Эти постулаты для мерзлотных почвогрунтов обоснованы в работах [8, 9].

Скорость притока влаги к фронту промерзания Р. Рюкли вычислял по формуле

$$V = K_g \frac{P_s}{P_w l},$$

где  $K_g$  – проницаемость грунта;  $P_s$  – сила всасывания;  $P_w$  – удельный вес воды;  $l$  – расстояние от ледяных линз до уровня грунтовых вод.

Данную формулу возможно использовать при изменении уровня грунтовых вод в незначительных пределах. Если он находится глубоко, то скорость притока воды к границе замерзания почвы будет стремиться к нулю, т. е. практически отсутствовать. Когда фронт промерзания достигнет уровня грунтовых вод, вода начнет подсасываться со слишком большой скоростью, не соответствующей естественным условиям процесса пучения. Недостаток данной теории в том, что не учтено парообразное увлажнение грунта, которое осуществляется под действием температурных градиентов.

Изучению механизмов влагопереноса в грунтах посвящены работы зарубежных [14–16, 19] и отечественных исследователей. Существенный вклад в разработку этого вопроса внесли А.М. Глобус, Б.В. Дерягин,

В.П. Панфилов, В.О. Орлов, А.И. Попов, Г.М. Фельдман, но в их исследованиях уделялось недостаточно внимания инженерному подходу к изучению давления пучения грунтов в зависимости от конкретных гидрогеологических условий местности [11].

Существенный вклад внес и В.М. Сиденко. В 1953 г. исследователь начал изучение водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна, рассматривая их при этом как комплексную конструкцию «одежда–полотно» [10]. Для анализа передвижения и накопления воды В.М. Сиденко обосновал принцип дифференцированного исследования, согласно которому водно-тепловой режим дорожных одежд и полотна классифицируется на 4 расчетных типа: диффузный, пленочный, капиллярный и инфильтрационный. В основу классификации положены следующие отличительные признаки [10]: источники увлажнения; степень водопроницаемости дорожного покрытия (наличие или отсутствие в покрытии трещин, а в одежде водопроницаемых слоев); распределение влажности по глубине дорожной конструкции в неблагоприятные по увлажнению периоды года; интервал сезонного колебания влажности, а следовательно, и деформируемости грунта.

В настоящее время существует ряд методов моделирования процессов, протекающих в дорожной конструкции лесовозных дорог под влиянием природно-климатических условий [1]. В основу большинства из них положена кристаллизационно-пленочная гипотеза миграции влаги, при этом базовой считается теория молекулярного массообмена в консолидируемой грунтовой массе [12].

Одним из основных достаточно точных методов расчета водно-теплого режима земляного полотна является теория Н.А. Пузакова. Согласно этому методу действие «сил всасывания» принимается как расчетный эквивалент суммарного действия сил миграции [12]. Три схемы расчета применяются в зависимости от источников увлажнения: сухие местности с обеспеченным стоком поверхностных вод, глубоким залеганием уровня грунтовых вод и малым количеством осадков; районы с достаточным количеством осадков и с затрудненным стоком поверхностных вод, накопление влаги происходит за счет перемещения пленочной и капиллярно-подвешенной воды; районы с близким расположением уровня грунтовых вод.

Данный метод позволяет определить глубину распространения отрицательной температуры в грунте. Ее расчет осуществляется по параболическому закону, и она может быть выражена формулой [7]

$$H_t = \sqrt{2\alpha_0 t_3},$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент, зависящий от рассматриваемой температуры и климатических условий местности, см<sup>2</sup>/сут;  $t_3$  – длительность промерзания, сут.

Недостатки метода Н.А. Пузакова, по мнению некоторых исследователей, следующие [4]: вызывает сомнение факт наличия критической глубины промерзания  $z_{кр}$ , поскольку в соответствии с принципом равновесного состояния Н.А. Цытовича процесс миграции и льдообразования протекает по всей толще промерзающего грунта; не учитываются термодинамика фазовых переходов воды, кондуктивный и конвективный характер теплообмена в слоистых дорожных конструкциях.

Скорость притока воды в зону промерзания описывается по формуле [7]

$$V = \frac{2K(W_k - W_0)}{H - z},$$

где  $K$  – коэффициент капиллярной влагопроводимости грунта, см<sup>2</sup>/сут;  $W_k$  – капиллярная влагоемкость грунта, доля от объема;  $W_0$  – начальная влажность грунта, доля от объема.

Эта формула отражает процесс перемещения влаги лишь при глубине промерзания меньше глубины залегания грунтовых вод ( $z < H$ ). Если  $z = H$ , скорость миграции влаги принимает бесконечно большую величину, поэтому формула применима лишь при  $z < 0,75H$ . Для случая  $z = H$  М.Б. Корсунским была разработана эмпирическая формула [4]:

$$V = \frac{2K(W_k - W_0)}{0,125H_{\text{exp}} 2,80 \left(1 - \frac{z}{H}\right)}.$$

Если в методе расчета водно-теплового режима Н.А. Пузакова граница промерзания описывается уравнением параболы, то в методе расчета И.А. Золотаря, где скорость миграции влаги зависит от режима промерзания грунта, скорость промерзания характеризуется по линейной или параболической зависимости [8].

В случае, когда граница промерзания описывается линейно, согласно И.А. Золотарю, скорость миграции влаги к зоне промерзания будет находиться по формуле [2]

$$V_{\text{миг}} = \frac{\rho_{\text{ск}}}{\rho_{\text{в}}} (W_0 - W_x) F V_x,$$

где  $\rho_{\text{ск}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – плотность скелета грунта и воды соответственно, т/м<sup>3</sup>;  $W_x$  – влажность грунта на границе промерзания, доля от объема;  $F$  – площадь под кривой изотермы, см<sup>2</sup>;  $V_x$  – скорость промерзания грунта, см/сут.

Когда промерзание протекает по параболическому закону, формула примет вид [2]:

$$V_{\text{миг}} = \frac{\rho_{\text{ск}}}{\rho_{\text{в}}} \sqrt{\frac{\alpha_m}{\pi t}} (W_0 - W_x) F V_x \quad \text{при} \quad z = \frac{\alpha}{2\sqrt{\alpha_m}},$$

где  $\alpha$  – скорость промерзания конструкции;  $\alpha_m$  – коэффициент теплопроводности при пленочном характере переноса влаги.

Метод расчета И.А. Золотаря больше применим для прогнозирования водно-теплового режима в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, так как рассматривает миграцию влаги только в качестве одномерного процесса при монотонно промерзающем грунтовом полупространстве [12].

Методика расчета теплового режима дорожной конструкции следующая [10].

1. Подготовка исходных данных. Определяют толщину слоев дорожной одежды  $h$ , объемные веса  $\gamma$ , коэффициенты теплопроводности и теплоемкости, средние температуры воздуха  $t_{\text{в}}$  за определенный период  $\Delta T$ , скорости ветра  $V$ , температуры грунта  $t_{\text{гр}}$ .

2. Определение начальных условий. В начальный момент времени устанавливают непосредственным наблюдением или расчетом температуры в различных плоскостях дорожной конструкции  $t_{1,T}, \dots, t_{m,T}$ .

3. Расчет температур. Каждый слой дорожной конструкции разбивают на  $m$  частей. Нумерацию плоскостей ведут снизу вверх, совмещая нулевую плоскость с плоскостью грунта температуры  $t_{гр}$ . Определяют максимальные температуры  $\Delta T_{max}$  каждой плоскости, наименьшее из полученных значений принимают в качестве расчетного для всей дорожной конструкции. Вычисляют коэффициенты теплоперехода  $\alpha$ :

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_H$$

где  $\alpha_K$  – конвекция;  $\alpha_H$  – излучение.

Находят температуры дорожной конструкции в различное время:

$$T + n\Delta T.$$

Место проведения полевых испытаний по измерению температуры в дорожной конструкции – площадка в г. Перми, по адресу: улица Академика Королева, дом 19 а. Площадка исследований представляет собой практически ровный асфальтированный участок, на котором устроена скважина глубиной 3 м (рис. 1).

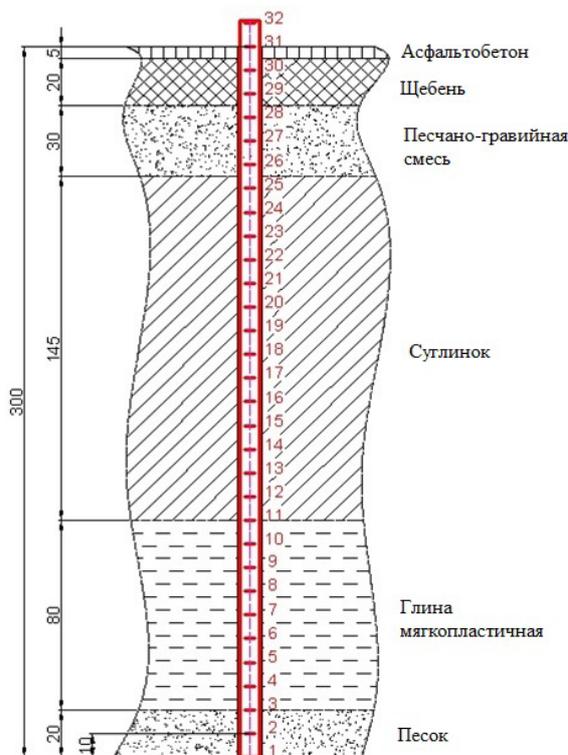


Рис. 1. Расположение датчиков для измерения температуры в дорожной конструкции

Fig. 1. Layout of sensors for measuring temperature in the road structure

На всю глубину скважины заглублена трубка со встроенными внутри 32 датчиками температуры, расположенными с шагом 10 см. Датчик 1 соответствует наибольшей глубине скважины (3 м), а 32-й находится выше уровня асфальтобетонного покрытия и фиксирует температуру приземного слоя воздуха. Датчики способны выполнять измерения в диапазоне  $-55...+125$  °С.

Датчики передают сведения через провод и специальный блок, подключаемый посредством USB-порта, на персональный компьютер. В качестве программного обеспечения выступает программа VM1707.exe. Датчики температуры и программное обеспечение для измерения температуры в дорожной конструкции разработаны ООО «Олимп» (Москва).

## Результаты исследования и их обсуждение

Измерения температуры в дорожной конструкции проводились с ноября 2019 г. по апрель 2020 г. При этом с ноября по 28 февраля на покрытии исследуемой дорожной конструкции присутствовал снежный накат с максимальной толщиной к концу зимнего периода 11 см (рис. 2).

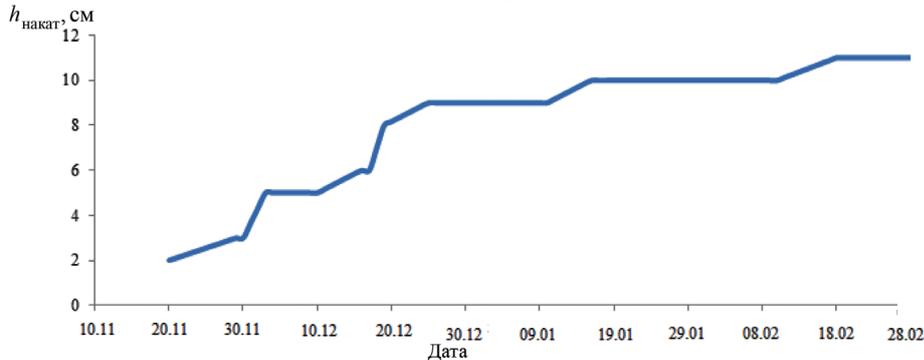


Рис. 2. Изменение толщины снежного наката за период наблюдений

Fig. 2. Changes in the thickness of the packed snow over the observation period

По данным таблиц средних температур в дорожной конструкции при наличии и отсутствии снежного наката построен график (рис. 3).

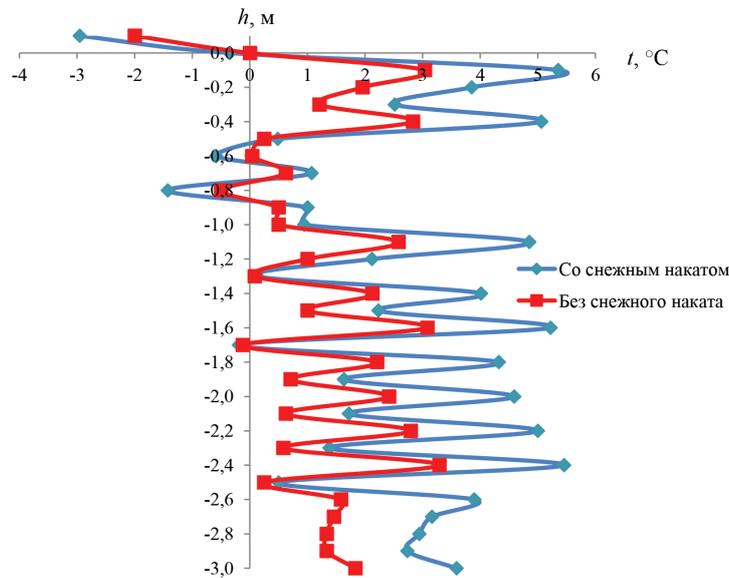


Рис. 3. Температура в дорожной конструкции при наличии и отсутствии снежного наката на покрытии

Fig. 3. Temperature in the road structure in the presence and absence of the packed snow on the surface

По результатам измерений построены графики, показывающие среднюю температуру в дорожной конструкции в зависимости от времени года (рис. 4). График на рис. 4, а учитывает измерения температуры в дорожной конструкции только за ноябрь 2019 г., а график на рис. 4, в – только за март и апрель 2020 г.



Данные наблюдений позволяют предположить, что в весенний период происходят медленное остывание земляного полотна на глубине 3 м и прогревание верхней части дорожной конструкции, что не противоречит результатам известных исследований. При этом изменения температуры в слоях дорожной конструкции носят нелинейный характер по причине разных теплофизических свойств материалов дорожной одежды и земляного полотна.

Получен сводный график разницы средних температур в дорожной конструкции в разное время года (рис. 5).

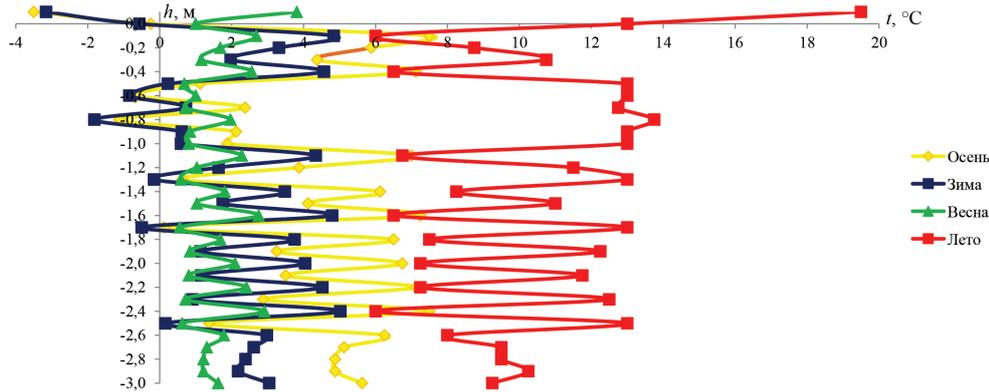


Рис. 5. Средняя температура в дорожной конструкции в разное время года

Fig. 5. Average temperatures in the road structure at different times of the year

Для выявления особенностей влияния солнечной радиации на температуру покрытия построен график температуры в дорожной конструкции при наличии и отсутствии солнечной радиации (рис. 6).

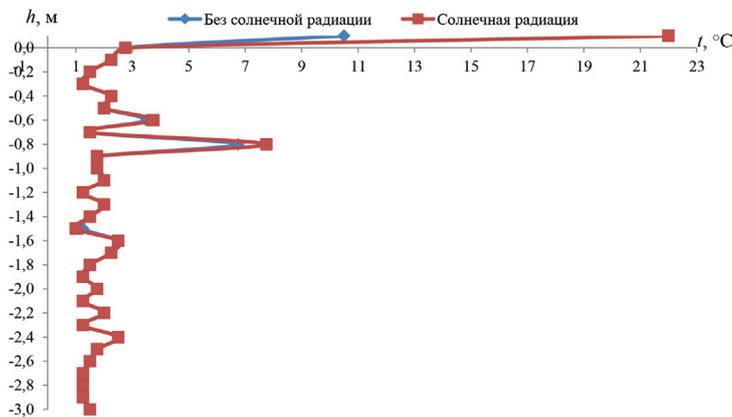


Рис. 6. Температура в дорожной конструкции при наличии и отсутствии солнечной радиации

Fig. 6. Temperature in the road structure in the presence and absence of solar radiation

В качестве примера взяты данные двух измерений за 19 апреля 2020 г. Первое проводилось в 10:00 при температуре наружного воздуха +11 °C в пасмурную погоду, при этом верхний датчик температуры был закрыт от воздей-

ствия прямых солнечных лучей. Второе – в 14:00 при температуре наружного воздуха +12 °С в ясную солнечную погоду, верхний датчик не был защищен от воздействия прямых солнечных лучей.

Теплофизические свойства определяют особенности процесса теплообмена, являются базовыми при установлении и прогнозировании глубины и скорости промерзания и оттаивания дорожных конструкций; имеют большое значение в проектировании, строительстве и эксплуатации различных объектов, когда в грунте происходит передача тепла. Основные такие свойства – теплопроводность и теплоемкость. Значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости для слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна представлены в таблице.

**Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости для исследуемой дорожной конструкции**

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
Асфальтобетон	1,25	0,92
Щебень	1,39	0,85
Песчано-гравийная смесь	2,10	1,00
Суглинок	1,62	1,15
Глина	1,62	0,88
Песок	1,91	0,835
Снег (при $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$ )	0,35	–

*Заключение*

На основании проведенных полевых исследований была получена зависимость изменения температуры дорожной конструкции по слоям. Выявлено, что изменение температуры в слоях дорожной конструкции носит нелинейный характер, это связано с различной теплоемкостью и теплопроводностью материалов дорожной конструкции. Установлены зависимости влияния снежного наката на температуру в дорожной конструкции и солнечной радиации на температуру покрытия лесовозных дорог.

Изучение особенностей водно-теплового режима дорожных конструкций представляет собой важную, но в то же время трудоемкую задачу, решение которой возможно лишь при условии совместной работы ученых, инженеров-проектировщиков и строителей.

Мониторинг теплового режима в дорожных конструкциях на каждой конкретной территории позволяет прогнозировать изменения температуры в дорожной конструкции и своевременно принимать меры по ограничению движения тяжелых транспортных лесовозных средств, что впоследствии может иметь немалый экономический эффект за счет предотвращения разрушения дорожно-покрытия.

Учет теплопроводности и теплоемкости дорожно-строительных материалов дает возможность регулирования теплового режима в слоях дорожных одежд, снижения негативного влияния природно-климатических условий на устойчивость дорожных конструкций и срок службы автомобильной лесовозной дороги в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ефименко С.В. Обоснование расчетных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд автомобильных дорог (на примере районов Западной Сибири): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2006. 22 с. Efimenko S.V. *Justification of the Calculated Values of the Characteristics of Clay Soils for the Design of Road Surfaces of Highways (Case Study of the Regions of Western Siberia)*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Omsk, 2006. 22 p.
2. Золотарь И.А. Теоретические основы применения тонкодисперсных грунтов для возведения земляного полотна автомобильных дорог в северных районах области многолетнемерзлых грунтов: моногр. М.: Транспорт, 1988. 134 с. Zolotar' I.A. *Theoretical Background of the Use of Fine Dispersed Soils for the Construction of the Roadbed in the Northern Areas of the Region of Permafrost Soils*: Monograph. Moscow, Transport Publ., 1988. 134 p.
3. Иванов Д.В., Зарипин Ю.А. Методы регулирования водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития. Тамбов: ТГТУ. 2011. Вып. II. С. 255–259. Ivanov D.V., Zarin Yu.A. Methods for Regulating the Water and Heat Regime of the Roadbed. *Problems of Technogenic Safety and Sustainable Development*. Tambov, TSTU Publ., 2011, iss. II, pp. 255–259.
4. Корсунский М.Б., Россовский П.Д., Волчанский Г.В. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог в районах сезонного промерзания // Тр. СоюзДорНИИ. 1966. Вып. 13. С. 14–28. Korsunskiy M.B., Rossovskiy P.D., Volchanskiy G.V. Regulation of the Water and Heat Regime of the Roadbed in Areas of Seasonal Freezing. *Trudy SoyuzDorNII*, 1966, iss. 13, pp. 14–28.
5. Кулижников А.М. Комплексное проектирование автомобильных дорог на основе пространственного моделирования (на примере Европейского Севера России): автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1998. 37 с. Kulizhnikov A.M. *Complex Design of Roads on the Basis of Spatial Modeling (Case Study of the European North of Russia)*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1998. 37 p.
6. Леонович И.И., Вырко Н.П. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. 332 с. Leonovich I.I., Vyrko N.P. *Water and Heat Regime of the Roadbed of Highways*. Minsk, BNTU Publ., 2013. 332 p.
7. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. М.: Автотрансиздат, 1960. 168 с. Puzakov N.A. *Water and Heat Regime of the Roadbed of Highways*. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1960. 168 p.
8. Рудов С.Е., Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 106–119. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Features of Contact Interaction between the Skidding System and Frozen Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.106>
9. Рудов С.Е., Шапиро 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. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-101-117>

10. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплового режима дорожных одежд и земляного полотна. М.: Автотрансиздат, 1962. 116 с. Sidenko V.M. *Calculation and Regulation of the Water and Heat Regime of Road Surfaces and Roadbed*. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1962. 116 p.
11. Толстеньев С.В. Развитие методов прогнозирования и регулирования водно-теплового режима земляного полотна эксплуатируемых автомобильных дорог (на примере Алтайского края): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2002. 18 с. Tolstenev S.V. *Development of Methods for Forecasting and Regulating the Water and Heat Regime of the Roadbed of Operated Highways (Case Study of Altai Krai)*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Omsk, 2002. 18 p.
12. Ярмолинский В.А., Лопашук В.В., Лопашук А.В. Регулирование водно-теплового режима автомобильных дорог Камчатского края для повышения их надежности в процессе эксплуатации. Хабаровск: ТОГУ, 2014. 182 с. Yarmolinsky V.A., Lopashuk V.V., Lopashuk A.V. *Regulation of the Water and Heat Regime of Highways of Kamchatka Krai to Increase Their Reliability during Operation*. Khabarovsk, PSU Publ., 2014. 182 p.
13. De Jong G., Kouwenhoven M., Bates J., Koster P., Verhoef E., Tavasszy L., Warffemius P. New SP-Values of Time and Reliability for Freight Transport in the Netherlands. *Transport Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, vol. 64, pp. 71–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.008>
14. Gates J.B., Scanlon B.R., Mu X., Zhang L. Impacts of Soil Conservation on Groundwater Recharge in the Semi-Arid Loess Plateau, China. *Hydrogeology Journal*, 2011, vol. 19, iss. 4, art. 865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0716-3>
15. Huo S., Jin M., Liang X., Lin D. Changes of Vertical Groundwater Recharge with Increase in Thickness of Vadose Zone Simulated by One-Dimensional Variably Saturated Flow Model. *Journal of Earth Science*, 2014, vol. 25, iss. 6, pp. 1043–1050. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0486-7>
16. Ibrahim M., Favreau G., Scanlon B.R., Seidel J.L., le Coz M., Demarty J., Cappelaere B. Long-Term Increase in Diffuse Groundwater Recharge Following Expansion of Rainfed Cultivation in the Sahel, West Africa. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, iss. 6, pp. 1293–1305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1143-z>
17. Kouwenhoven M., de Jong G.C., Koster P., van den Berg V.A.C., Verhoef E.T., Bates J., Warffemius P.M.J. New Values of Time and Reliability in Passenger Transport in the Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 2014, vol. 47, pp. 37–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.017>
18. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678–694.
19. Kurtzman D., Scanlon B.R. Groundwater Recharge through Vertisols: Irrigated Cropland vs. Natural Land, Israel. *Vadose Zone Journal*, 2011, vol. 10, iss. 2, pp. 662–674. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0109>
20. Peer S., Koopmans C.C., Verhoef E.T. Prediction of Travel Time Variability for Cost-Benefit Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, vol. 46, iss. 1, pp. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.016>

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 539.12.08+699.887.5(022)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-159-169

**ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ  
ДЛЯ СОЗДАНИЯ НЕЙТРОНОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ***А.Р. Бирман<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-3713-2019](https://orcid.org/0000-0002-1693-0515),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>**А.А. Тамби<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>**С.А. Узрюмов<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>**П.Р. Гильванов<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAZ-9283-2021](https://orcid.org/0000-0003-0051-8857),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0051-8857>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: birman1947@mail.ru, ugr-s@yandex.ru

<sup>2</sup> Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; e-mail: a\_tambi@mail.ru

<sup>3</sup> Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, Россия, 197198; e-mail: vka\_kaf104@mail.ru

---

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 07.04.21 / Принята к печати 02.08.21

---

**Аннотация.** Рассмотрен способ получения нейтронозащитных материалов на основе модифицированной древесины березы. Для создания защиты от нейтронного излучения в атомной промышленности, медицине и военно-промышленном комплексе широко используются материалы на основе полиэтилена с добавлением бора. За счет высокого содержания водорода их применение позволяет защитить объекты от воздействия быстрых нейтронов, а тепловые нейтроны эффективно сдерживаются благодаря наличию в защитных экранах атомов бора. Древесина также является водородосодержащим материалом, поэтому представляет научный и практический интерес создание и исследование свойств нейтронозащитных материалов на ее основе. Наиболее целесообразно создание нейтронозащитных материалов из древесины лиственных пород, характеризующихся высокой удельной плотностью и, соответственно, большим содержанием водорода в единице объема. Увеличить содержание водорода в единице объема древесины, и, следовательно, снизить толщину защитного слоя можно уплотнением древесины способом плоского (одноосного) прессования. Основное условие получения высокопрочной и формоустойчивой прессованной древесины – сохранение ее микроструктуры (без повреждений) во время прессования. Теоретическим путем установлено, что оптимальная степень прессования, при которой наблюдается наименьший процент микроразрушений в древесине, составляет 50 %. В экспериментальной части работы для изготовления опытного нейтронозащитного материала использовали березовые пиломатериалы радиального распила длиной 200 мм, шириной 100 мм и толщиной 80 мм. Получены нейтронозащитные материалы толщиной 40 мм, эквивалентные по содержанию водорода в единице объема защите из полиэтилена толщиной 26,8 мм.

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Как известно, в процессе плоского прессования в древесине возникают распирающие усилия, которые могут приводить к появлению трещин, разрушению кромок, выпучиванию, расслаиванию, снижению равномерности распределения плотности. Распирающие усилия действуют в направлении, перпендикулярном действию приложенной нагрузки. Поэтому при изготовлении нейтронозащитного композиционного материала необходимо использовать пресс-формы с боковыми упорами, купирующие воздействие распирающего усилия. Конструктивные параметры пресс-форм и режимы прессования определены с учетом сопротивления, обусловленного силами трения древесины о боковые стенки пресс-формы. Представлена конструкция пресс-формы, обеспечивающая получение из древесины нейтронозащитного материала с заданными свойствами.

*Для цитирования:* Бирман А.Р., Тамби А.А., Угрюмов С.А., Гильванов П.Р. Технология модификации древесины березы для создания нейтронозащитных материалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 159–169. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-159-169

*Ключевые слова:* нейтронозащитный композиционный материал, модификация древесины, прессование, нагружение, пресс-форма.

## BIRCH WOOD MODIFICATION TECHNOLOGY FOR CREATING NEUTRON SHIELDING MATERIALS

*Alexei R. Birman*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-3713-2019](https://orcid.org/0000-0002-1693-0515), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>

*Alexander A. Tambi*<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

*Sergey A. Ugryumov*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

*Pavel R. Gilvanov*<sup>3</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAZ-9283-2021](https://orcid.org/0000-0003-0051-8857), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0051-8857>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, liter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: birman1947@mail.ru, ugr-s@yandex.ru

<sup>2</sup>Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation; e-mail: a\_tambi@mail.ru

<sup>3</sup>Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, ul. Zhdanovskaya, 13, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; e-mail: vka\_kaf104@mail.ru

---

Original article / Received on April 7, 2021 / Accepted on August 2, 2021

---

**Abstract.** The article considers a method for producing neutron shielding materials based on modified birch wood. It is known that shielding materials based on polyethylene with boron addition are widely used in the nuclear industry, medicine and the military-industrial complex to create protection against neutron radiation. Due to the high hydrogen content, their use makes it possible to protect objects from the effects of fast neutrons, and thermal neutrons are effectively contained due to the presence of boron atoms in the protective screens. Wood is also a hydrogen-containing material, therefore, it is of scientific and practical interest to create and study the properties of neutron shielding materials based on wood. The most expedient is the creation of neutron shielding materials from hardwood, which have a high specific density and, accordingly, a high content of hydrogen per unit volume. It is possible to increase the hydrogen content per unit volume of wood and, accordingly, to reduce the thickness of the protective layer due to the compaction of wood by the method of flat (single-axis) pressing. The main condition for obtaining high-strength and form-resistant pressed

---

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

wood is the preservation of its microstructure (without damage) during pressing. It has been theoretically found that the optimal pressing stage, at which the lowest percentage of microfractures in wood is observed, should not exceed 50 %. In the experimental part of the work, birch lumber was used for the production of an experimental neutron shielding material, radial sawn with a length of 200 mm, a width of 100 mm, and a thickness of 80 mm to obtain ready-made neutron shielding materials with a thickness of 40 mm, which is equivalent to a polyethylene shielding thickness of 26.8 mm. It is known that during flat pressing bursting forces occur in wood, which can lead to cracks, destruction of edges, buckling, delamination, and a decrease in the uniformity of the density distribution. The bursting force acts in the direction perpendicular to the action of the applied load. Therefore, in the manufacture of a neutron shielding composite material, it is necessary to use press molds (with side stops) that stop the impact of the bursting force. The design parameters of the press molds and pressing modes are determined taking into account the resistance caused by the friction forces of the wood against the side walls of the press mold. The design of a press mold that provides the production of a neutron shielding material of specified properties from wood is presented.

**For citation:** Birman A.R., Tambi A.A., Ugryumov S.A., Gilvanov P.R. Birch Wood Modification Technology for Creating Neutron Shielding Materials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 159–169. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-159-169

*Keywords:* neutron shielding composite material, wood modification, pressing, loading, press mold.

### *Введение*

Запрет вывоза круглых лесоматериалов из Российской Федерации и введение таможенных пошлин на экспорт пиломатериалов являются предпосылками для создания новых деревообрабатывающих производств внутри страны.

При этом Стратегия развития лесного комплекса до 2030 г. требует увеличения объемов заготовки древесины, что неминуемо приведет к вовлечению в переработку низкотоварной древесины с большой кривизной и эллиптичностью. Размерные характеристики такого сырья не позволят эффективно использовать его в производстве наиболее распространенных продуктов лесопромышленного комплекса – пиломатериалов и фанеры.

Тем не менее круглые лесоматериалы с пороками формы могут успешно применяться для создания востребованной высокомаржинальной продукции в виде нейтронозащитных материалов для атомной промышленности, предприятий военно-промышленного комплекса и медицинской сферы, что позволит не только сформировать новый рынок продукции для лесопромышленного комплекса, но и обеспечить здесь импортозамещение.

Для защиты от нейтронного излучения в названных сферах используются материалы торговой марки Neutrostop из полиэтилена, а также полиэтилена с добавлением бора в объеме 3,5–5 %, выпускаемые в Чехии. За счет высокого содержания водорода их применение позволяет защитить объекты от воздействия быстрых нейтронов, а наличие в защитных экранах атомов бора [5, 25] эффективно сдерживает тепловые нейтроны.

Анализ химического состава полиэтилена  $(C_2H_4)_n$  показывает, что массовая доля содержания в нем C = 86 %, а H = 14 %. Средняя плотность полиэтилена низкого давления – 950 кг/м<sup>3</sup>, т. е. в 1 м<sup>3</sup> содержится 133 кг водорода.

Древесина также является водородосодержащим материалом. Доля химических элементов во всех древесных породах практически одинакова: С = 48,6 %, О = 45 %, Н = 6,4 % [7].

В березовой древесине, плотность которой в абсолютно сухом состоянии – 620 кг/м<sup>3</sup>, в 1 м<sup>3</sup> – 39,7 кг водорода. У древесины влажностью 12 % содержание водорода больше – до 44,6 кг.

Таким образом, при замене полиэтилена древесиной толщина ее слоя, обладающего равными с полиэтиленом защитными свойствами, при учете экранирующей способности только по содержанию водорода должна быть больше в 2,98 раза, чем при использовании полиэтилена. При этом масса защиты увеличится всего в 2,01 раза. Одним из основных критериев оценки защитного слоя становится толщина, снижение которой – актуальная задача.

Цель исследования – разработка способа модификации древесины березы для создания из нее нейтронозащитного материала.

#### *Объекты и методы исследования*

Для создания нейтронозащитных материалов из древесины наиболее целесообразно использовать лиственные породы: они обладают высокой удельной плотностью и, соответственно, большим содержанием водорода в единице объема. Увеличить содержание водорода в единице объема древесины и, следовательно, снизить толщину защитного слоя возможно за счет уплотнения [1, 2, 9, 20, 22, 26].

Для проведения исследований выбрана древесина березы, что обусловлено ее высокой плотностью и широким распространением, обеспечивающим ее эксплуатационную доступность. Древесина березы, обладая хорошими механическими свойствами, занимает первое место по промышленному применению среди лиственных пород Российской Федерации [12].

Древесина березы по плотности (см. таблицу) незначительно уступает древесине бука и дуба, но стоит значительно меньше, а получаемые из этой породы сортименты, малого диаметра и имеющие кривизну, не находят промышленного применения. Вовлечение их в промышленную переработку позволит повысить экономическую эффективность лесозаготовительных предприятий [11].

**Плотность пород древесины в зависимости от ее влажности, кг/м<sup>3</sup>**

Порода	Влажность 12 %	Абсолютно сухая древесина
Осина	495	465
Береза	640	620
Бук	680	650
Дуб	690	655

Береза обладает меньшей на 10 % прочностью при сжатии по сравнению с дубом, но почти одинаковой с ним прочностью при статическом изгибе и более высокой (на 10 %) удельной работой при ударном изгибе [12, 19].

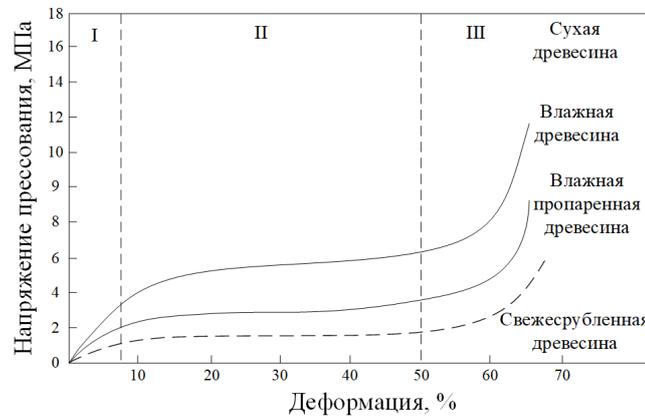
Для уплотнения древесины целесообразно использовать способ плоского (одноосного) прессования заготовок. Усилие прессования в этом случае определяется по формуле

$$P = bl\sigma_x,$$

где  $P$  – необходимое усилие прессования;  $b$  и  $l$  – соответственно ширина и длина образца;  $\sigma_x$  – сопротивление древесины прессованию [18, 21, 23].

Процессы, протекающие в древесине при сжатии поперек волокон, представлены на диаграмме (рис. 1) [2, 8, 16, 24, 29]. Как видно из нее, деформация древесины при сжатии поперек волокон протекает в три фазы. Первая фаза занимает на диаграмме  $\sigma$ – $\varepsilon$  ( $\sigma$  – напряжение прессования, МПа,  $\varepsilon$  – деформация, %) участок от  $\varepsilon = 0\%$  до  $\varepsilon = 3\text{--}6\%$ , что определяется как влажностью, так и температурой древесины. В первой фазе деформация протекает практически линейно. Во второй – значительно медленнее и располагается в диапазоне от  $\varepsilon = 3\text{--}6\%$  до  $\varepsilon = 45\text{--}55\%$ .

Рис. 1. Зависимость деформации от напряжения при прессовании древесины. I–III – фазы деформации  
Fig. 1. Dependence of deformation on stress during wood pressing. I – III – phases of deformation



Предельная величина деформации во второй фазе определяется плотностью и влажностным состоянием древесины: чем выше плотность и ниже влажность исходной древесины, тем меньше конечная величина деформации в этой фазе и тем большее напряжение деформации необходимо создавать для достижения заданного уровня деформации. Третья фаза деформации описывается плавной кривой с очень крутым подъемом. Между второй и третьей фазами наблюдается медленный переход. Во всех трех фазах происходит смятие анатомических элементов древесины. Зависимость между деформацией и напряжением может быть выражена уравнением

$$\varepsilon = \sigma/E + (1/2\eta)(\sigma^2/\nu),$$

где  $E$  – модуль упругости древесины при сжатии поперек волокон;  $\eta$  – коэффициент вязкости материала;  $\nu$  – скорость нагружения (const).

Деформация оболочек клеток древесины подчиняется данному уравнению только до определенного значения напряжения. За пределами этого значения закон деформации оболочек резко изменяется. Предельным значением становится критическое напряжение  $\sigma_{кр}$ , с наступлением которого оболочки клеток значительно деформируются и сминаются, а дальнейшая деформация протекает почти при неизменном давлении. Момент начала смятия оболочек клеток является концом первой и началом второй фазы деформации сжатия древесины поперек волокон.

Главное условие получения высокопрочной прессованной древесины – сохранение ее микроструктуры (без разрушения) во время прессования. Исходя из анализа рис. 1 и литературных источников оптимальная степень прессования, при которой наблюдается появление микроразрушений в древесине [8, 13, 15], в том числе под воздействием температуры, – 50 %, что является граничным значением.

Таким образом, для сохранения структуры уплотненной древесины рационально осуществлять упрессовку до наступления третьей фазы. Это позволит избежать образования в древесине значительных напряжений, вызываемых деформацией поздней древесины, которые могут привести к ее распрессовке после стабилизации в эксплуатационных условиях. Достижимая при этом степень уплотнения уменьшает объем древесины в 2 раза, а толщина нейтронозащитного материала из нее будет всего в 1,49 раза больше, чем из полиэтилена, при равном содержании водорода в единице объема.

Для изготовления опытного нейтронозащитного материала использовали березовые пиломатериалы, имеющие радиальный наклон волокон, изготовленные в соответствии с ГОСТ 2695–83. Исходные размеры образцов: толщина – 80 мм; ширина ( $b$ ), измеренная поперек волокон древесины, – 100 мм; длина ( $l$ ), измеренная вдоль волокон древесины, – 200 мм.

Исходные размеры образца позволяют получать готовые нейтронозащитные материалы толщиной 40 мм, что эквивалентно по содержанию водорода в единице объема толщине защиты из полиэтилена, равной 26,8 мм.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Контактной поверхностью образца является площадь  $b \times l$ .

Подготовка пиломатериалов к уплотнению включает их предварительную сушку в конвективных сушильных камерах до влажности 30 % в режиме 9-Б [3].

Для обеспечения деформирования и уплотнения древесины в соответствии с данными о предельной степени деформации (50 %) был принят режим прессования [14], учитывающий необходимость воздействия на древесину температурой для повышения ее деформативности за счет снижения модуля упругости. Последующее охлаждение деформированной древесины в зажатом состоянии осуществляется для стабилизации размеров и формы готовых изделий.

При плоском прессовании в древесине возникают распирающие усилия, которые могут приводить к появлению в обрабатываемом материале трещин, разрушению кромок, выпучиванию и расслаиванию образцов, снижению равномерности распределения плотности в их объеме и т. д. [4, 27]. В процессе уплотнения древесины распирающие усилия действуют в направлении, перпендикулярном действию приложенной нагрузки. Отношение бокового давления к давлению прессования учитывается коэффициентом бокового давления. Зависимость бокового давления от давления прессования для изделий с различной формой сечения имеет линейный характер.

При изготовлении нейтронозащитного композиционного материала необходимо использовать пресс-формы, купирующие воздействие распирающего усилия. Это принципиально важно, поскольку основной задачей является

формирование материала со свойствами, минимально различающимися в зависимости от объема, а полученные изделия должны иметь высокую точность формы. Следовательно, в случае использования наименее энергоемкого и самого простого в реализации метода плоского прессования для сохранения формы древесины при нарастании деформации нужно применять пресс-формы с боковыми упорами. Их наличие обеспечит протекание деформации в заданном направлении без расширений образца, что может случаться, если древесина прессуется в открытом прессе [28].

Расчитывая конструктивные параметры пресс-форм и режимов прессования, необходимо учитывать сопротивление, обусловленное силами трения древесины о боковые стенки пресс-формы, которое определяется по формуле

$$P_{\text{доп}} = P_1(1 + f),$$

где  $P_1$  – распирающее усилие;  $f$  – коэффициент трения древесины о стенки пресс-формы.

Вертикальные стенки пресс-формы имеют дополнительную функцию: при изготовлении их высотой, равной высоте готового изделия, они работают и в качестве вертикальных упоров, ограничивающих перемещение плиты пресса. Простота конструкции такой пресс-формы обеспечивает ее невысокую стоимость.

Для проведения экспериментальных запрессовок была изготовлена пресс-форма, позволяющая одновременно обрабатывать от 1 до 18 образцов. Выбор многопозиционной пресс-формы объясняется тем, что ее опорная площадь достаточно велика и при прессовании отпадает необходимость установки между плитами дополнительных опор, предотвращающих деформацию верхней плиты.

Требуемое расчетное усилие при запрессовке одного образца

$$F = PS_1 = 15 \cdot 10^6 \cdot 0,02 = 30,6 \text{ т.с.},$$

где  $P$  с учетом преодоления сил трения  $P_{\text{доп}}$  находится в диапазоне 14,3–15,2 МПа, при расчетах пресс-формы  $P$  принималось равным 15 МПа;  $S_1$  – контактная площадь образца,  $S_1 = 0,02 \text{ м}^2$ .

Расчетная площадь пресс-формы в плане – 0,49 м<sup>2</sup>; масса – около 60 кг.

Сборочный чертеж пресс-формы представлен на рис. 2.

Пресс-форма представляет собой сварную конструкцию из стандартных швеллеров № 12 с параллельными полками. Крайние полки швеллеров, воспринимающие нормальные распирающие усилия спрессованной древесины, дополнительно укреплены уголками 50×50×4 мм и 12 ребрами жесткости, в 4 из которых имеются отверстия для пропуска грузозахватных элементов, при необходимости используемых во время перемещения пресс-формы.

Просвет между внутренними поверхностями швеллеров составляет 104,4 мм, что позволяет свободно располагать заготовки стандартной ширины, 100 мм, в ручьях пресс-формы.

Заготовки высотой 80 мм, размещенные в пресс-форме, нагревают в прессе до температуры, предусмотренной технологическим режимом [2, 6, 10, 17], и подвергают прессованию. При достижении деформации 50 % верхняя плита пресса ложится на полки швеллеров пресс-формы. Размер спрессованных образцов по высоте в этот период достигает заданной величины, 40 мм.

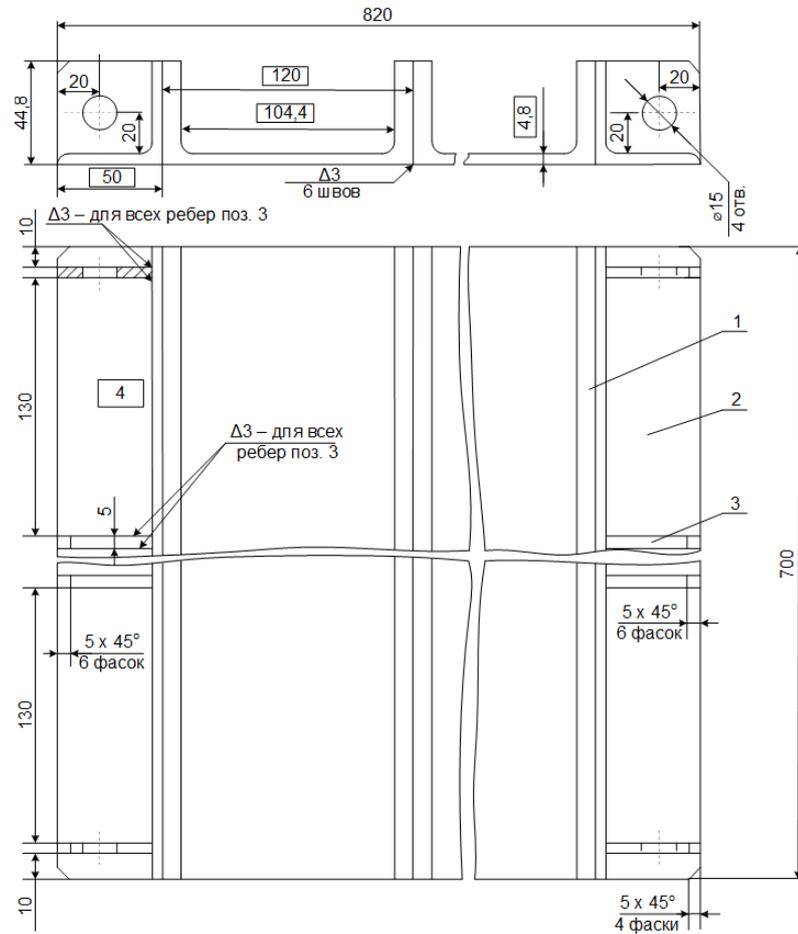


Рис. 2. Пресс-форма одноосного прессования: 1 – ребро, количество – 12 шт., расположены на расстоянии 130 мм друг от друга; 2 – уголок равнополочный, 2 шт., 50×50×4, ГОСТ 8509–93, из Ст. 3 по ГОСТ 535–2005; 3 – швеллер № 12П, ГОСТ 8240–89, из Ст. 3 по ГОСТ 535–2005. Рамкой обозначены справочные размеры  
 Fig. 2. Single-axis press mold: 1 – an edge located at a distance of 130 mm from each other, 12 pcs.; 2 – an equal flange angle block, 50×50×4, State Standard GOST 8509–93, Steel Ст. 3 according to the State Standard GOST 535–2005, 2 pcs.; 3 – channel no. 12P, State Standard GOST 8240–89, Steel Ст. 3 according to the State Standard GOST 535–2005; the dimensions in the frame are for reference

По завершении термопьезообработки пресс-форму извлекают из пресса, выгружают готовую продукцию, и процесс прессования повторяется.

Для работы в производственных условиях рекомендуется подавать пресс-форму в пресс с загрузочной этажерки, а выгрузку образцов осуществлять толкателем, направленным вдоль швеллеров.

#### Выводы

1. Древесина может использоваться в качестве нейтронозащитного материала.

2. Для создания нейтронозащитных материалов из древесины рекомендуется ее уплотнение способом плоского (одноосного) прессования.

3. Рациональным является уплотнение древесины в 2 раза по сравнению с ее исходным состоянием, что обеспечивает минимальную толщину защитных материалов при сохранении целостности ее внутренней структуры.

4. Модифицированная уплотнением древесина березы может эффективно заменить материалы из полиэтилена при создании защиты от нейтронного излучения в медицинских организациях, на предприятиях военно-промышленного комплекса и в других сферах.

5. Оценка защитных свойств древесины произведена с учетом наличия в ней влаги в виде воды ( $H_2O$ ). Однако связанная влага в древесине содержит и другие, кроме Н и О, элементы, которые дополнительно повышают ее нейтронозащитные свойства. Учет влияния дополнительных элементов, присутствующих в связанной влаге древесины, на ее нейтронозащитные свойства является темой дальнейших исследований.

6. Разработанная технология модификации древесины березы и пресс-форма для ее прессования могут быть полезны отраслевым предприятиям и внедрены в производство в ближайшее время.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бирман А.Р., Белоногова Н.А. Нейтронозащитные свойства древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 1. С. 101–106. Birman A.R., Belonogova N.A. Neutron-Shielding Wood Characteristics. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2008, no. 1, pp. 101–106. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/279/279bc2fa19ff8f346e3988f2ad6c7849.pdf>

2. Бирман А.Р., Белоногова Н.А., Соколова В.А. Нейтронозащитные материалы из древесины // Изв. СПбЛТА. 2015. Вып. 212. С. 176–184. Birman A.R., Belonogova N.A., Sokolova V.A. Neutron Protective Wood Materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2015, iss. 212, pp. 176–184.

3. Болдырев П.В. Сушка древесины. Практическое руководство. СПб.: ПРОФИКС, 2002. 156 с. Boldyrev P.V. *Drying of Wood. Practical Guide*. Saint Petersburg, PROFIKS Publ., 2002. 156 p.

4. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 528 с. Goncharov N.A., Bashinskiy V.Yu., Buglay B.M. *Technology of Wood Products*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 528 p.

5. Официальный сайт производителя материала Neutrostop АО «Копос колин». Режим доступа: <https://www.kopos.ru/sites/default/files/catalog/2017/10/neutrostop.pdf> (дата обращения: 13.06.21). *The Official Website of the Manufacturer of the Material Neutrostop AO "Kopos kolin"*.

6. Патыкин В.И., Бирман А.Р. Использование древесины для защиты от нейтронных излучений // Материалы 57-й науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та. СПб.: СПбГАСУ, 2000. С. 86–87. Patyakin V.I., Birman A.R. The Use of Wood for Protection from Neutron Radiation. *Materials of the 57-th Scientific Conference of Professors, Lecturers, Researchers, Engineers and Postgraduates of the University*. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2000, pp. 86–87.

7. Перелыгин Л.М. Древесиноведение. М.: Сов. наука, 1957. 363 с. Perelygin L.M. *Wood Science*. Moscow, Sovetskaya nauka Publ., 1957. 363 p.

8. Рыдченко Г.Д. Двустороннее прессование древесины // Исследование конструкций и физико-механических свойств материалов. Воронеж: ВЛТИ, 1967. Т. 31. С. 25–28. Rydchenko G.D. Double-Ended Pressing of Wood. *Research of Structures and Physical and Mechanical Properties of Materials*. Voronezh, VLTI Publ., 1967, vol. 31, pp. 25–28.
9. Соколова В.А., Бирман А.Р., Орлов В.В., Тепноев А.В., Кривоногова А.С., Бачериков И.В., Парфенопуло Г.К. Использование железо-водных и дерево-железных смесей в защите от ионизирующих излучений // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 1(37). С. 94–99. Sokolova V.A., Birman A.R., Orlov V.V., Tepnoev A.V., Krivonogova A.S., Bacherikov I.V., Parfenopulo G.K. The Use of Iron-Water and Wood-Iron Mixtures in Protection from Ionizing Radiation. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 1(37), pp. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-1-94-99>
10. Соловьева Т.В., Ревяко М.М., Хмызов И.А. Технология древесных композиционных материалов и изделий. Минск: БГТУ, 2008. 180 с. Solov'yova T.V., Revyako M.M., Khmyzov I.A. *Technology of Wood Composite Materials and Products*. Minsk, BSTU Publ., 2008. 180 p.
11. Тамби А.А., Григорьев И.В., Куницкая О.А. Обоснование необходимости внедрения процессов промышленного лесопиления в структуру лесозаготовительной отрасли // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 76–88. Tambi A.A., Grigor'ev I.V., Kunitskaya O.A. The Rationale for Implementation of Industrial Sawmilling Processes in the Logging Industry. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 76–88. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.76>
12. Уголев Б.Н. Испытания древесины и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 251 с. Ugolev B.N. *Testing Wood and Wood Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 251 p.
13. Хухрянский П.Н. Дерево вместо металла. Воронеж: ВГЛТА, 1954. 44 с. Khukhryanskiy P.N. *Wood instead of Metal*. Voronezh, VGLTA Publ., 1954. 44 p.
14. Хухрянский П.Н. Прессование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1964. 361 с. Khukhryanskiy P.N. *Wood Pressing*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1964. 361 p.
15. Шамаев В.А. Химико-механическое модифицирование древесины. Воронеж: ВГЛТА, 2003. 260 с. Shamaev V.A. *Chemical and Mechanical Modification of Wood*. Voronezh, VSFTA Publ., 2003. 260 p.
16. Шамаев В.А., Воскобойников И.В., Щелоков В.М. Достижения и проблемы модифицированной древесины // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: тр. IV междунар. евраз. симп. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. С. 224–235. Shamaev V.A., Voskoboynikov I.V., Shchelokov V.M. Achievements and Problems of Modified Wood. *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century. Proceedings of the IV International Eurasian Symposium*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2009, pp. 224–235.
17. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины. М.: ФЛИНТА, 2013. 448 с. Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification*. Moscow, FLINTA Publ., 2013. 448 p.
18. Шамаев В.А., Скориданов Р.В., Постников В.В. Получение модифицированной древесины с высокими прочностными свойствами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 4. С. 78–83. Shamaev V.A., Skoridanov R.V., Postnikov V.V. Producing Modified Timber with High Strength Properties. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2006, no. 4, pp. 78–83.
19. Шейкман Д.В. Технология модифицирования древесины мягких лиственных пород и березы для напольных покрытий: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 207 с. Sheykman D.V. *Technology of Modifying Deciduous Wood and Birch Wood for Floor Coverings*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2017. 207 p.

- 
20. Baily P.J., Preston R.D. Some Aspects of Softwood Permeability. II. Flow of Polar and Non-Polar Liquids through Sapwood and Heartwood of Douglas Fir. *Holzforschung*, 1970, B. 24, H. 2, pp. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1970.24.2.37>
21. Baker J.M., Morgan Jn-n, Muller E.R., Savory J.C. Manipulation of Double Vacuum Sheds in Treatment of Scots Pine Sapwood. *Record of the 1973 Annual Convention of the British Wood Preserving Association*. Cambridge, 1973, pp. 183–199.
22. Bramhall G. The Validity of Darcy Law in the Axial Penetration of Wood. *Wood Science and Technology*, 1971, vol. 5, iss. 2, pp. 121–134. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01134223>
23. Comstock G.L. Longitudinal Permeability of Green Eastern Hemlock. *Forest Products Journal*, 1965, vol. 15, iss. 10, pp. 441–449.
24. Hammer R.M. De Aethel. *Talanta*, 1980, vol. 27, no. 6, p. 535.
25. *Neutrostop. Export – Import KOVO*. Praha, 1985. 5 p.
26. Practical Vacuum Treating Plant for the Retail Lumber Yard. *Building Supply News*, 1952, no. 1, pp. 58–61.
27. Stamm A.J. Penetration of Hardwoods by Liquids. *Wood Science and Technology*, 1973, vol. 7, iss. 4, pp. 285–296. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00351074>
28. Sucoff E.J., Chen P.Y.S., Hossfeld R.L. Permeability of Unseasoned Xylem of Northern White Cedar. *Forest Products Journal*, 1965, vol. 15, iss. 8, pp. 321–324.
29. Tambi A.A., Ignatenko S.V., Shinkarenko S.Yu., Kul'kov A.M., Grigor'ev I.V., Yurkova O.V., Sazhin V.E. Study of Wood Glued Joints Formed by Urea Melamine Formaldehyde Binders. *Polymer Science, Series D*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421219010209>

УДК 621.365.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-170-177

## ФОРМИРОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛОТНЕ КРУГЛОЙ ПИЛЫ

**В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012).

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

**И.И. Соловьев, канд. техн. наук;** *ResearcherID:* [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073).

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>

**Н.Г. Пономарева, канд. техн. наук;** *ResearcherID:* [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631).

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 18.04.21 / Принята к печати 26.08.21

---

**Аннотация.** Рабочим инструментом круглопильных станков является круглая пила. Ее состояние во многом определяет качество обработки материала. Полотно круглой пилы в процессе резания подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов. Они вызывают удлинение и деформацию пильного полотна, возникновение внутренних напряжений, выводящих его из плоской формы упругого равновесия и снижающих работоспособность инструмента. Возможность пил противодействовать этим факторам определяется жесткостью и устойчивостью пильного полотна. Полотно круглой пилы принято условно делить на три зоны: периферийную, среднюю и центральную. Наибольшее влияние на устойчивость оказывает средняя часть диска. Первоначально пильный диск имеет плоскую форму равновесия, которое может быть нарушено любым внешним воздействием на пилу в процессе резания. Нарушение равновесия становится причиной отклонения полотна и режущей кромки пилы от исходного рабочего состояния и снижения точности и качества обработки древесины. Для предотвращения влияния внешних сил у круглой пилы в средней части полотна формируют коаксиальные зоны пластической деформации определенной ширины. При этом под действием созданных напряжений появляется эффект натяжения полотна. Применяют два способа формирования таких зон: проковку и вальцевание. Создание нормированных напряжений в пильном диске круглой пилы осуществляют локальным контактным воздействием рабочего органа пиллоправного инструмента на стальной диск пилы в определенных местах средней зоны. В обработанных кольцевых зонах формируют напряжения сжатия, компенсирующие силы центробежного ускорения, температурный нагрев отдельных зон полотна пилы, внешние продольные и поперечные изгибающие силы, возникающие в полотне при обработке древесины. Способы создания кольцевых зон полей пластической деформации, предусматривающие механическое воздействие на полотно пилы, имеют существенные недостатки. Для их устранения необходимы принципиально новые технические решения. Предложено формировать коаксиальные поля остаточных напряжений диска пилы термоматрическим воздействием, заключающимся в создании нормированных остаточных напряжений в пильном полотне концентрированным тепловым воздействием по всей толщине полотна на локальные коаксиально расположенные по нему кольцевые зоны. Смоделирован процесс формирования коаксиальных кольцевых полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы. Рассмотренный способ подготовки пилы позволит повысить ее устойчивость в процессе работы.

*Для цитирования:* Мелехов В.И., Соловьев И.И., Пономарева Н.Г. Формирование коаксиальных полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 170–177. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-170-177

*Ключевые слова:* термопластические напряжения, круглая пила, устойчивость пилы, высокоскоростной нагрев, кольцевая зона.

## FORMATION OF COAXIAL FIELDS OF RESIDUAL STRESSES IN THE CIRCULAR SAW BLADE

*Vladimir I. Melekhov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>*

*Ivan I. Solovev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABE-7412-2020](https://orcid.org/0000-0002-2008-7073).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>*

*Nataliya G. Ponomareva, Candidate of Engineering; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: v.melekhov@narfu.ru, i.solovev@narfu.ru, n.ponomareva@narfu.ru

---

**Original article** / Received on April 18, 2021 / Accepted on August 26, 2021

---

**Abstract.** The working tool of machines with circular cutting units is a circular saw, the condition of which largely determines the quality of material processing. Circular saw blades in the process of operation are subjected to a complex effect of force and temperature factors that cause elongation and deformation of the saw blade, and the occurrence of internal stresses that take it out of the flat form of elastic balance and reduce the tool's performance. The ability of saws to resist these factors is determined by the rigidity and stability of the saw blade. It is customary to consider a circular saw blade consisting of three zones: peripheral, middle and central. The middle part has the greatest influence on the stability of the saw blade. Initially, after manufacturing, the saw blade has a flat shape of balance, which can be disturbed by any external impact on the saw during the cutting process. The balance disturbance causes the blade and the cutting edge of the saw to deviate from the initial operating condition and reduce the accuracy and quality of wood processing. In order to prevent the influence of external forces, coaxial zones of plastic deformation of a certain width are formed in the middle part of the blade. In this case, under the influence of the created stresses, the effect of web tension appears. In world practice, two methods of forming such zones are used: forging and rolling. The creation of normalized stresses in the circular saw blade is carried out by local mechanical contact action of the working body of the saw tool on the steel saw blade in certain places of the middle zone. Compressive stresses compensating the forces of centrifugal acceleration, the thermal heating of individual zones of the saw blade, the external longitudinal and transverse bending forces that occur in the blade during wood processing are formed in the treated annular zones. The considered methods for creating annular zones of plastic deformation fields involving mechanical action on the saw blade have significant drawbacks, the elimination of which requires fundamentally new technical solutions. It is proposed to form coaxial fields of residual stresses of the saw blade by thermoplastic action consisting in creation of normalized residual stresses in the saw blade by concentrated thermal action on local annular zones coaxially located along the saw blade for the entire thickness of the saw. The formation of coaxial circular fields of residual stresses in the circular saw blade is simulated. The considered method of saw preparation will increase its stability in the process of operation.

**For citation:** Melekhov V.I., Solovev I.I., Ponomareva N.G. Formation of Coaxial Fields of Residual Stresses in the Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 170–177. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-170-177

**Keywords:** thermoplastic stresses, circular saw, saw stability, high-speed heating, annular zone.

### Введение

Круглопильные станки составляют основную часть оборудования деревообрабатывающего предприятия. Рабочим органом таких станков является круглая пила, состояние которой во многом определяет качество обработки материала.

Полотно круглой пилы, изготовленное из инструментальной стали, в процессе работы подвергается сложному воздействию силовых и температурных факторов [2–5, 15–19, 21]. Они вызывают удлинение и деформацию пильного полотна, обуславливают возникновение внутренних напряжений, выводящих его из плоской формы упругого равновесия и снижающих работоспособность инструмента. Способность пил противодействовать этим силовым воздействиям определяется жесткостью и устойчивостью полотна. Устойчивость характеризует потенциальную возможность полотна пилы сопротивляться силам, воздействующим на него в плоскости наибольшей жесткости [13].

Пила выполнена в виде тонкого стального диска с центральным отверстием и зубчатой кромкой. Принято рассматривать полотно круглой пилы как подразделяющееся на три зоны: периферийную, среднюю и центральную [15, 16, 18]. Центральная зона приходится на область зажимных шайб, поэтому практически не влияет на устойчивость диска, не участвует в балансе распределения напряжений и принимается как абсолютно жесткая. Наибольшее влияние на устойчивость оказывает средняя часть. Первоначально диск имеет плоскую форму равновесия, которое может быть нарушено любым внешним воздействием на пилу в процессе резания. Нарушение равновесия вызывает отклонение полотна и режущей кромки пилы от исходного рабочего состояния, снижает точность и качество обработки древесины. Для сохранения работоспособности круглой пилы в средней части полотна формируют коаксиальные зоны пластической деформации определенной ширины. При этом под воздействием созданных напряжений проявляется эффект натяжения полотна.

В мировой практике существуют два способа формирования таких зон: проковка и вальцевание. В обработанных кольцевых зонах создают напряжения сжатия, компенсирующие силы центробежного ускорения, температурный нагрев отдельных зон полотна пилы, внешние продольные и поперечные изгибающие силы, возникающие в полотне при обработке древесины. На практике создание нормированных напряжений в пильном диске круглой пилы традиционно осуществляют локальным контактным воздействием рабочего органа пилорамного инструмента на стальной диск пилы в определенных местах средней зоны.

При кольцевой проковке обрабатывают среднюю зону полотна пилы бойком молотка. Пластическая деформация полотна происходит в прокованных кольцах определенной ширины, что обеспечивает натяжение полотна. Внешний радиус кольцевой зоны обработки принимают  $(0,7 - 0,8) R_1$ , где  $R_1$  – радиус пилы без зубьев. Такой способ подготовки полотна пилы носит субъективный

характер, не всегда обеспечивает нормированные напряжения в точечных зонах проковки и требует высокой квалификации оператора.

При вальцевании обработка диска пилы проводится роликами непрерывно по концентрическим кольцевым зонам. При этом в обработанных кольцах за счет механической деформации металла в плоскости пильного диска возникают зоны пластической деформации материала, обеспечивающие натяжение полотна, как и при проковке.

По сравнению с кольцевой проковкой вальцевание характеризуется высокой степенью осевой симметрии натяжения полотна пилы. При этом плоскостность пилы в процессе работы сохраняется, а регулирование давления роликов позволяет выравнивать натяжение пильного диска по секторам. Однако следует отметить, что вальцевание сопровождается «изламыванием» металла по вальцовочному следу, что снижает механическую прочность полотна на изгиб.

Глубина следа проковки на поверхности полотна от ударов бойка инструмента составляет до 0,05 мм (ГОСТ 980–69), при вальцевании – до 0,1 мм, т. е. напряжения растяжения в точечных зонах при механическом воздействии возникают только в поверхностном слое, не распространяясь по толщине диска пилы и не формируя равномерного поля напряжений по толщине полотна [15, 16, 18, 22].

Оба рассмотренных способа создания кольцевых зон полей пластической деформации предусматривают механическое воздействие на полотно пилы, обуславливающее негативные последствия, отмеченные выше. Для их предотвращения необходимы принципиально новые технические решения. Одним из направлений формирования нормированных полей напряжений в полотне пилы может быть локальный нагрев кольцевых зон.

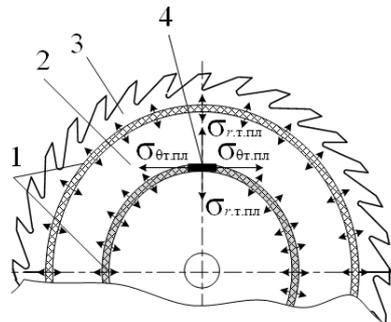
Следует отметить, что вопрос формирования полей остаточных термопластических напряжений по кольцевому следу практически не изучен. В связи с этим цель нашей работы – провести целенаправленные исследования данного вопроса для обоснования разработки практических рекомендаций по подготовке круглых пил термопластическим воздействием.

#### Объекты и методы исследования

Предложено формировать коаксиальные поля остаточных напряжений диска пилы теплофизическим воздействием [7–11, 14], заключающимся в создании нормированных остаточных напряжений в пильном полотне концентрированным тепловым воздействием на локальные коаксиально расположенные по всей толщине полотна пилы кольцевые зоны (рис. 1). Предполагается контроль процесса в режиме реального времени.

Рис. 1. Круглая пила с кольцевыми зонами нагрева: 1 – коаксиально расположенные кольцевые зоны нагрева; 2 – диск пилы; 3 – зубчатая кромка; 4 – кольцевая зона нагрева

Fig. 1. Circular saw with annular heating zones: 1 – coaxially arranged annular heating zones; 2 – saw blade; 3 – toothed edge; 4 – annular heating zone



Рассматриваемый термопластический способ создания нормированных напряжений в диске пилы основан на высокоскоростном нагреве локальных кольцевых зон по всей толщине полотна пилы и получении позонно расположенных по диску пилы полей температурных напряжений, превышающих предел текучести металла и приводящих к появлению вторичных термопластических остаточных деформаций [8]. Это формирует в полотне пилы поля остаточных напряжений, позволяющие обеспечить устойчивое состояние пилы в процессе работы.

Создана математическая модель процесса формирования и количественной оценки остаточных напряжений после термопластического деформирования материала при нагреве локальной зоны на всю толщину полотна пилы [20].

Смоделирован процесс формирования коаксиальных кольцевых полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы диаметром 500 мм и толщиной 2,5 мм. Материал пилы – сталь 9ХФ со следующими характеристиками [6]: модуль упругости (Юнга)  $E = 196,1$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,27$ ; предел текучести  $\sigma_{0,2}$  определяется по графику зависимости предела текучести стали от температуры, МПа; среднее значение коэффициента линейного расширения  $\alpha(t) = 11 \cdot 10^{-6}$  1/°С. Температура нагрева локальных кольцевых зон полотна пилы  $t = 300$  °С.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Остаточные термопластические напряжения в полотне пилы формируются первоначальными температурными деформациями [2–5], возникающими при равномерном нагреве локального кольцевого элемента на всю толщину полотна с последующим охлаждением.

При нагреве локального участка до температуры  $t$  в нем возникают температурные напряжения [1]

$$\sigma_t = -E\alpha(t)t.$$

При  $t = 300$  °С температурные напряжения, равные 647 МПа, превышают предел текучести стали 9ХФ,  $\sigma_{0,2;300} \approx 320$  МПа. Пластичность снижает остаточные термопластические напряжения  $\sigma_{\text{т.пл}}$  [1, 12]. При температуре 300 °С не учитываем упрочнение материала полотна пилы в зоне нагрева. Тогда остаточные термопластические напряжения, возникшие в локальной кольцевой зоне по всей толщине полотна пилы после охлаждения,  $\sigma_{\text{т.пл}} \approx \sigma_{0,2;300} \approx 320$  МПа.

В процессе пиления древесины периферийная зона диска пилы нагревается больше центральной. Возникающий температурный градиент по радиусу диска и соответствующие ему температурные напряжения приводят к потере устойчивости и плоской формы равновесия диска [15, 17]. Температурные напряжения определяются температурным градиентом  $\Delta T$  и законом распределения температуры по радиусу диска (рис. 2).

Распределение температурных напряжений в полотне круглой пилы в тангенциальном  $\sigma_{\theta T}$  и радиальном  $\sigma_{rT}$  направлениях [16]:

$$\sigma_{\theta T} = \Delta T \alpha_{\text{л}} E \left[ n_1 \eta_1 \left( \frac{r}{R} \right)^{n_1 - 1} + (n_1 + 1) \eta_2 \left( \frac{r}{R} \right)^{n_1} - \eta_3 \left( \frac{r}{R} \right)^{-2} + \eta_4 \right];$$

$$\sigma_{rT} = \Delta T \alpha_n E \left[ \eta_1 \left( \frac{r}{R} \right)^{n_1 - 1} + \eta_2 \left( \frac{r}{R} \right)^{n_1} - \eta_3 \left( \frac{r}{R} \right)^{-2} + \eta_4 \right],$$

где  $\Delta T$  – температурный градиент;  $\alpha_n$  – коэффициент линейного расширения;  $E$  – модуль упругости (Юнга);  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  – функции, определяемые показателем степени  $n_1$  в законе распределения температур [16], отношением диаметра фланца  $d_\phi$  к диаметру диска пилы и отношением температур центральной и периферийной зон диска;  $r$  – текущий (рассматриваемый) радиус;  $R$  – радиус диска пилы.

Рис. 2. Температурные напряжения в диске пилы: 1 – диск пилы; 2 – зажимной фланец; 3 – центральное отверстие; 4 – рассматриваемая кольцевая зона диска; 5 – элемент кольцевой зоны

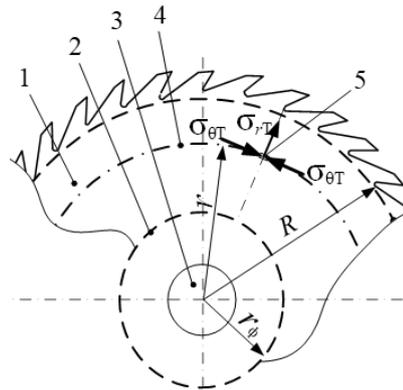


Fig. 2. Temperature stresses in the saw blade: 1 – saw blade; 2 – clamping flange; 3 – central hole; 4 – disc annular zone under consideration; 5 – annular zone element

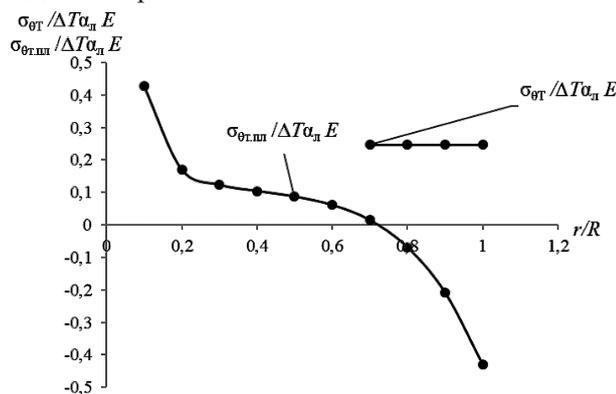
При выполнении расчетов принято  $n_1 = 5, d_\phi = 100$  мм,  $\Delta T = 30$  °С, тогда  $\eta_1 = 0,042; \eta_2 = -0,179; \eta_3 = -5,705 \cdot 10^{-3}; \eta_4 = 0,143$ .

Радиальные температурные напряжения по всему радиусу диска положительные [15], поэтому наибольшее значение с точки зрения устойчивости круглой пилы представляют тангенциальные составляющие температурных напряжений.

Расчет распределения тангенциальных составляющих температурных и термопластических напряжений по радиусу диска круглой пилы выполнен с использованием программного комплекса Mathcad. Графики распределения напряжений по диску пилы приведены на рис. 3.

Рис. 3. Распределение температурных и термопластических напряжений по радиусу диска круглой пилы

Fig. 3. Distribution of thermal and thermoplastic stresses along the radius of the circular saw blade



Из графика видно, что неравномерный нагрев по радиусу диска обуславливает тангенциальные напряжения растяжения в центральной и сжатия – в периферийных зонах диска. Наличие в периферийной зоне сжимающих температурных напряжений приводит к ослаблению зубчатой кромки, потере

плоскостности и устойчивости полотна пилы. Точка перехода тангенциальных напряжений растяжения в напряжения сжатия находится на относительном радиусе диска  $r$ , равном  $0,75R$ , и определяет границу раздела между средней и периферийной зонами диска. Этот радиус соответствует радиусу окружности, принятому при вальцевании по одной окружности [16]. Зона термопластического воздействия располагается непосредственно в периферийной зоне диска. Это воздействие вызывает в ней растягивающие тангенциальные термопластические напряжения, компенсирующие сжимающие температурные напряжения. Величина термопластических напряжений зависит от температуры нагрева и ширины нагреваемой кольцевой зоны.

#### Заключение

Формирование коаксиальных полей остаточных напряжений в полотне круглой пилы термопластическим воздействием является новым подходом и позволяет кардинально изменить подготовку круглой пилы к работе с обеспечением устойчивости пильного диска в процессе резания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с. Birger I.A. *Residual Stresses*. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
2. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. 329 с. Bogatov A.A. *Mechanical Properties and Models of Metal Destruction*. Yekaterinburg, USTU-UPI Publ., 2002. 329 p.
3. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 95–101. Bogatov A.A. Residual Stresses and Metal Destruction. *Proceedings of the 6th International Youth Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering"*. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2013, pp. 95–101.
4. Боровиков Е.М., Орлов Б.Ф. Термический способ подготовки круглых пил к работе // Изв. вузов. Лесн. журн. 1974. № 6. С. 90–96. Borovikov E.M., Orlov B.F. Thermal Method of Preparing Circular Saws for Operation. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1974, no. 6, pp. 90–96. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1974/B.pdf>
5. Бородин И.Н., Майер А.Е., Петров Ю.В., Груздков А.А. Максимум предела текучести при квазистатической и высокоскоростной пластической деформации металлов // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, вып. 12. С. 2384–2393. Borodin I.N., Mayer A.E., Petrov Yu.V., Gruzdkov A.A. Maximum Yield Strength under Quasi-Static and High-Speed Plastic Deformation of Metals. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2014, vol. 56, iss. 12, pp. 2384–2393. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783414120051>
6. ГОСТ 5950–2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия: дата введения 2002-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 35 с. *State Standard GOST 5950–2000. Tool Alloy Steel Bars, Strips and Coils. General Specifications*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2003. 35 p.
7. Мелехов В.И., Соловьев И.И. Создание термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 87–90. Melekhov V.I., Soloviev I.I. Creation of Thermoplastic Tension in Circular Saw Blade. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2010, no. 2, pp. 87–90. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b08/b087c4466253da22ed3e19c778437576.pdf>

8. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Тюрикова Т.В., Пономарева Н.Г. Повышение устойчивости дереворежущих пил термопластическим воздействием на распределение остаточных напряжений в полотне // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 172–181. Melekhov V.I., Solov'ev I.I., Tyurikova T.V., Ponomareva N.G. Improving the Stability of Wood-Cutting Saws by Thermoplastic Action on the Distribution of Residual Stresses in the Blade. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 6, pp. 172–181. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-172-181>
9. Патент 2434952 РФ. Устройство для создания термопластических напряжений в пильном диске круглой пилы: № 2010117098: заявл. 29.04.2010; опубл. 27.11.2011 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев. Solov'ev I.I., Melekhov V.I. *Device to Develop Thermoplastic Stresses in Saw Blade of Ring Saw*. Patent RF no. RU 2434952 C1, 2011.
10. Патент 2614863 РФ. Устройство для создания термопластических напряжений в полосовых пилах: № 2015141255: заявл. 28.09.2015; опубл. 29.03.2017 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев. Melekhov V.I., Solov'ev I.I. *Device for Creation of Thermoplastic Concentrated Stresses in Strip Saws*. Patent RF no. RU 2614863 C1, 2017.
11. Патент 2663029 РФ. Способ термопластического натяжения пильного диска круглой пилы: № 2017121665: заявл. 21.06.2017; опубл. 01.08.2018 / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев. Solov'ev I.I., Melekhov V.I. *Method of Thermoplastic Tensioning of the Round Saw Circular Saw Blade*. Patent RF no. RU 2663029 C1, 2018.
12. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения: моногр. М.: Наука, 1982. 109 с. Pozdeyev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Residual Stresses: Theory and Applications*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 109 p.
13. Прокофьев Г.Ф. Создание высокотехнологичных лесопильных станков: моногр. Архангельск, 2018. 157 с. Prokof'ev G.F. *Creation of High-Tech Sawmills*. Arkhangelsk, 2018. 157 p.
14. Соловьев И.И. Совершенствование термопластической технологии подготовки круглых пил: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 18 с. Solov'ev I.I. *Improvement of Thermoplastic Technology for Preparing Circular Saws*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2012. 18 p.
15. Стахийев Ю.М. Устойчивость и колебания плоских круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 296 с. Stakhiyev Yu.M. *Stability and Vibrations of Flat Circular Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 296 p.
16. Стахийев Ю.М. Научно-технологические основы производства, подготовки и эксплуатации плоских круглых пил для распиловки древесины: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2002. 32 с. Stakhiyev Yu.M. *Scientific and Technological Bases of Production, Preparation and Operation of Flat Round Saws for Wood Sawing*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2002. 32 p.
17. Якунин Н.К. Подготовка круглых пил к работе. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 153 с. Yakunin N.K. *Preparation of Circular Saws for Operation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 153 p.
18. Bayer R.J. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. New York, CRC Press, 2004. 416 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203021798>
19. Bathe K.-J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 1982. 735 p.
20. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983. 763 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>
21. Hughes T.J.R., Hinton E. *Finite Element Methods for Plates and Shells: Elements Technology*. Swansea, Pineridge Press, 1986, vol. 1. 315 p.
22. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press, 2009. 856 p.



УДК 62-784.43

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА СВЯЗУЮЩЕГО  
НА СВОЙСТВА ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ  
БУМАГ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА****Н.А. Криницин<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [AAX-7163-2021](https://orcid.org/0000-0002-2185-2734),****ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2185-2734>****В.К. Дубовый<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [W-1235-2017](https://orcid.org/0000-0002-2903-3872),****ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>****К.В. Полякова<sup>2</sup>, химик группы производственного контроля;****ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2332-6260>****И.Н. Ковернинский<sup>3</sup>, д-р техн. наук, проф.;****ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-6790>**<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;e-mail: [krinnikita@yandex.ru](mailto:krinnikita@yandex.ru), [dubovy2004@mail.ru](mailto:dubovy2004@mail.ru)<sup>2</sup>Фармацевтическая компания АО «Фармасинтез-Норд», ул. Дорога в Каменку, д. 74, Санкт-Петербург, Россия, 194356<sup>3</sup>ИП «Ковернинский И.Н.», ул. Дубнинская, д. 40 а, корп. 1, кв. 11, Москва, Россия, 127591; e-mail: [kovern@list.ru](mailto:kovern@list.ru)**Оригинальная статья / Поступила в редакцию 15.10.20 / Принята к печати 20.01.21**

**Аннотация.** На данный момент существует большое количество материалов для фильтрации воздуха. Однако есть необходимость разработки новых более эффективных и экономически выгодных материалов. Многочисленные исследования показали, что в целях получения высокоэффективного фильтровального материала для тонкой очистки воздуха от частиц размером 0,1...0,5 мкм в композицию необходимо вводить ультра- и микротонкие стеклянные волокна. Стеклянные волокна характеризуются целым комплексом уникальных свойств: термо-, хемо- и биостойкостью, высокими удельной поверхностью, фильтрующей способностью и прочностью, устойчивостью к действию агрессивных сред. При этом стеклянные волокна в отличие от волокон растительного происхождения не обладают способностью к фибриллированию, набуханию и связеобразованию. Таким образом, для получения прочного фильтровального материала требуется связующее, которое обеспечило бы необходимую технологическую прочность с сохранением заданных фильтрующих характеристик. Проведено исследование композиционного материала на основе минерального волокна, в качестве связующих использованы полиядерные комплексы алюминия, термомеханическая масса, поливинилацетат и полиэтилен. Основными показателями выбраны предел прочности при растяжении, капиллярная впитываемость, сопротивление потоку воздуха и коэффициент проницаемости. Новизна работы заключается в применении как связующих в композиционном материале на основе стеклянных волокон термомеханической массы и полиэтилена. Добавление связующего на основе термомеханической массы в композицию целесообразно в количестве 5...30 % от массы волокна, для полиэтилена этот

Данная статья опубликована в режиме открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) • Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

диапазон составляет 2...10 %. Композиционный материал, в который в качестве связующего добавлен полиэтилен, обладает достаточной технологической прочностью, низкими коэффициентом проницаемости и сопротивлением потоку воздуха. Применение полиэтилена как связующего в предназначенных для очистки воздуха композиционных фильтровальных материалах на основе стеклянных волокон является перспективным. **Для цитирования:** Криницин Н.А., Дубовый В.К., Полякова К.В., Ковернинский И.Н. Исследование влияния вида связующего на свойства фильтровальных стекловолокнистых бумаг для очистки воздуха // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 178–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192

**Ключевые слова:** стекловолокно, фильтровальные материалы, очистка воздуха, капиллярная впитываемость, прочность при растяжении, сопротивление потоку воздуха, коэффициент проницаемости, полиэтилен, термомеханическая масса, поливинилацетат, связующий материал.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF BINDER TYPE ON THE PROPERTIES OF GLASS FIBER FILTER PAPER FOR AIR PURIFICATION

*Nikita A. Krinitsin*<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAX-7163-2021](https://orcid.org/0000-0002-2185-2734),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2185-2734>

*Vladimir K. Dubovy*<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [W-1235-2017](https://orcid.org/0000-0002-2903-3872),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

*Kseniya V. Polyakova*<sup>2</sup>, Production Control Chemist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2332-6260>

*Ivan N. Koverninsky*<sup>3</sup>, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-6790>

<sup>1</sup>Sankt-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: krinnikita@yandex.ru, dubovy2004@mail.ru

<sup>2</sup>Pharmaceutical Company AO “Pharmasyntez-Nord”, ul. Doroga v Kamenku, 74, Saint Petersburg, 194356, Russian Federation

<sup>3</sup>IP “Koverninsky I.N.”, ul. Dubninskaya, 40 a, korp. 1, kv. 11, Moscow, 127591, Russian Federation; e-mail: kovern@list.ru

---

**Original article** / Received on October 15, 2020 / Accepted on January 20, 2021

---

**Abstract.** At the moment, there is a wide variety of materials for air filtration, however, it is necessary to develop new, more efficient and cost-effective materials. Numerous studies have shown that in order to obtain a highly effective filter material for fine air purification from particles of 0.1–0.5  $\mu\text{m}$ , ultrafine and microfine glass fibers should be introduced into the composition. Glass fibers have a whole complex of unique properties: thermal, chemical and biological resistance, high specific surface area, filtering ability, strength and resistance to aggressive media. At the same time, glass fibers, unlike fibers of plant origin, do not have the ability to fibrillate, swell and bond formation. Therefore, a strong filter material requires a binder that provides the necessary technological strength while maintaining the specified filtering characteristics. The study of composite material based on mineral fiber was carried out, polyadheral complexes of aluminum, thermomechanical pulp (TMP), polyvinyl acetate (PVA) and polyethylene (PE) were used as binders. The main indicators are the tensile strength, capillary absorption, resistance to air flow and permeability coefficient. The novelty of this work lies in the application of TMP and PE as binders in the composite material based

---

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license • The authors declare that there is no conflict of interest

on glass fibers. The addition of a binder based on TMP to the composition is advisable in the range of 5–30 % of the fiber mass, for PE this range is 2–10 %. The studied composite material with the addition of PE as a binder has sufficient technological strength, a low coefficient of permeability and resistance to air flow. PE can be used as a promising binder for composite filter materials based on glass fibers for air purification.

**For citation:** Krinitsin N.A., Dubovy V.K., Polyakova K.V., Koverninsky I.N. Study of the Influence of Binder Type on the Properties of Glass Fiber Filter Paper for Air Purification. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 178–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192

**Keywords:** glass fiber, filter materials, air purification, capillary absorbency, tensile strength, airflow resistance, permeability coefficient, polyethylene, thermomechanical mass, polyvinyl acetate, binding material.

### *Введение*

Существует большое количество материалов, предназначенных для фильтрации воздуха. Однако поиск и разработка новых более эффективных и экономически выгодных материалов продолжаются. Многочисленные исследования показали, что для получения высокоэффективного фильтровального материала, очищающего воздух от частиц размером 0,1...0,5 мкм, необходимо введение в композицию ультра- и микротонких стеклянных волокон [4, 5, 10, 25]. Стеклянные волокна имеют целый комплекс уникальных свойств: термо-, хемо- и биостойкость, высокие удельную поверхность, фильтрующую способность и прочность, устойчивость к действию агрессивных сред [2, 3, 14, 16]. При этом следует отметить, что стеклянные волокна в отличие от волокон растительного происхождения не способны к фибриллированию, набуханию и связеобразованию [11, 17].

Стеклянные волокна являются гидрофильными, их поверхность покрыта монослоем гидроксильных групп, обуславливающих гигроскопичность в пределах 7...20 %. Несмотря на относительно высокую удельную поверхность и наличие гидроксильных групп, силы межволоконного взаимодействия в бумагоподобных материалах из стеклянных волокон крайне малы, из-за чего и прочность самого материала очень низкая. С этим связана необходимость введения связующих веществ в композицию фильтровального материала на основе стеклянных волокон [7, 9, 15, 20–24].

Использование неорганических связующих обеспечивает устойчивость фильтровальных материалов при высоких температурах (до 700 °С). Органические связующие в зависимости от химического состава дают возможность фильтровать воздушные среды при нормальных температурах. В качестве органических связующих были выбраны поливинилацетатная дисперсия и мелкодиспергированный водный раствор полиэтилена, обладающие хорошей адгезией к стеклянным волокнам. Водные дисперсии этих компонентов позволяют применять их по бумажной технологии. Также в качестве органического связующего используют волокна растительного сырья, т. к. они способны к связеобразованию и дают возможность создания взаимопроникающей сетчатой структуры «стеклянное волокно – растительное волокно». В качестве растительного волокнистого полуфабриката взята термомеханическая масса (ТММ) [6, 8]; неорганического связующего – сульфат алюминия как традиционный

химикат целлюлозно-бумажной промышленности. Полиядерные комплексы алюминия обладают высокой связеобразующей способностью по отношению к стеклянным волокнам и достаточно хорошими сорбционными характеристиками [12, 13, 18, 19].

#### *Объекты и методы исследования*

В качестве объекта исследования были выбраны три марки стекловолокна: М20-МТВ-0,25 (ТУ 6-19-062-63-87) – штапельное стекловолокно с диаметром волокна 0,25 мкм; М20-МТВ-0,40 (ТУ 6-11-483-79) – штапельное стекловолокно с диаметром волокна 0,40 мкм; М20-УТВ-0,60 (ТУ 6-11-389-76) – штапельное стекловолокно с диаметром волокна 0,60 мкм.

Взяты четыре вида связующих: сульфат алюминия – ч.д.а, ГОСТ 3758-75; термомеханическая масса – волокно производства АО «Волга», средняя длина волокна – 1,37 мм, разрывная длина – 4500 м, белизна – 64 %; полиэтилен (ПЭ) – водная дисперсия, экспериментальный образец; поливинилацетат (ПВА) – дисперсия, марка Д51С, ГОСТ 18992-80.

Исследование физико-механических показателей композиционных материалов и подготовка к нему выполнены с применением аппаратов, приборов и методик, описанных в источнике [1].

Лабораторные образцы стекловолокнистой бумаги листовой формы изготавливали из стекловолокна с добавками связующего в заданных соотношениях. Исследования проводили на образцах массой 80 г/м<sup>2</sup>.

Для получения образцов стекловолокнистую суспензию готовили с учетом свойств стеклянного волокна – большой длины и хрупкости. Роспуск минерального волокна производили в воде на быстроходной мешалке при скорости 800 об./мин. Время диспергирования определено экспериментально – 8 мин. Концентрация массы составила 0,3 %. Образцы с упрочняющими агентами получали добавлением к суспензии волокна предварительно рассчитанного количества связующего.

Подготовленную композицию для равномерного распределения всех компонентов в массе перемешивали в течение 5 мин. Лабораторные образцы изготавливали на листоотливном аппарате Rapid-Kothen. Волокнистую массу разбавляли в формующей колбе до 8 л. Полученный образец помещали в сушильную камеру аппарата Rapid-Kothen и сушили до постоянной массы 1 м<sup>2</sup>.

Образцы кондиционировали (по ГОСТ 13523-78) и устанавливали их толщину (по ГОСТ 27015-86). С ее учетом пересчитывали в мегапаскалях разрывное усилие образцов, измеренное в ньютонах на вертикальной разрывной машине Hounsfield (ГОСТ ИСО 1924-1-96). Предел прочности при растяжении (технологическая прочность) вычисляли в мегапаскалях с учетом массы 1 м<sup>2</sup> образцов.

Сопrotивление образцов потоку воздуха (перепад давления) и коэффициент проницаемости определяли согласно ГОСТ Р ЕН 1822-3-2012 и ГОСТ Р ЕН 1822-5-2014 на фильтр-тестере 3160-TSI. Капиллярную впитываемость устанавливали методом Клемма (ГОСТ 12602-93), массу 1 м<sup>2</sup> – по ГОСТ 13199-88. Классификация фильтров приведена согласно ГОСТ Р ЕН 779-2007.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе изучали влияние дисперсии ПВА на прочностные и фильтрующие характеристики стекловолоконных бумаг. На втором рассматривали свойства стекловолоконных бумаг, в качестве связующего в которых был использован мелкодисперсный водный раствор ПЭ. На третьем этапе определяли влияние ТММ и сульфата алюминия на показатели качества стекловолоконных бумаг.

*Первый этап.* В качестве связующего использовали ПВА марки Д51С. ПВА обладает хорошей адгезионной способностью по отношению к стеклянным волокнам, поэтому применение его в качестве связующего должно привести к увеличению прочности получаемого продукта. На рис. 1 представлены результаты исследований влияния расхода ПВА на предел прочности при растяжении у стекловолоконных бумаг.

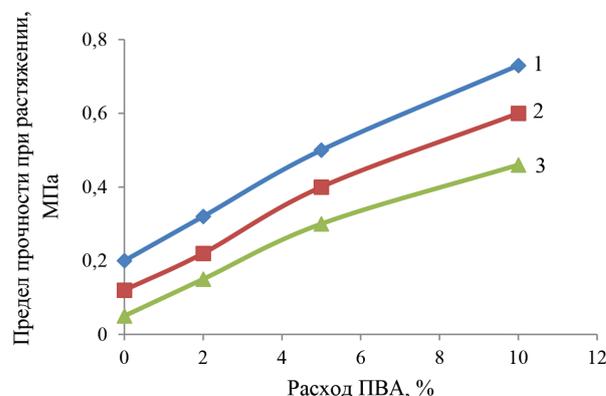


Рис. 1. Влияние расхода ПВА на предел прочности при растяжении для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 1. Influence of PVA consumption on tensile strength for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Результаты свидетельствуют о том, что с ростом расхода связующего предел прочности при растяжении увеличивается, а диаметр волокна уменьшается. Прочность достигает максимальных значений при расходе 10 % ПВА: для УТВ-0,60 – 0,46 МПа, для МТВ-0,40 – 0,60 МПа, для МТВ-0,25 – 0,73 МПа.

Для максимальных значений прочности при расходе связующего 10 % была исследована по Клемму капиллярная впитываемость образцов стекловолоконной бумаги (рис. 2).

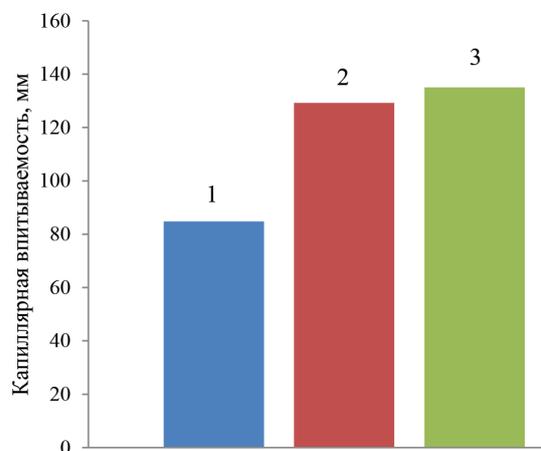


Рис. 2. Капиллярная впитываемость при расходе ПВА 10 % для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 2. Capillary absorbency at PVA consumption of 10 % for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

С увеличением диаметра волокна капиллярная впитываемость возрастает и достигает максимума для марки волокна УТВ-0,60 135 мм за 10 мин. При этом с увеличением диаметра волокна от 0,25 мкм до 0,40 мкм она растет существенно – от 85 мм до 129 мм, а при увеличении диаметра волокна от 0,40 мкм до 0,60 мкм прирост составляет всего 6 мм.

Представленные на рис. 1 и 2 данные позволяют сделать вывод о достаточной технологической прочности и развитой капиллярно-пористой структуре полученных образцов фильтровальной бумаги.

У фильтровальных материалов для очистки воздуха определяющими являются два показателя: коэффициент проницаемости (обратная величина эффективности очистки) и сопротивление потоку воздуха. Результаты исследований влияния расхода связующего ПВА на эти показатели представлены в табл. 1 и на рис. 3.

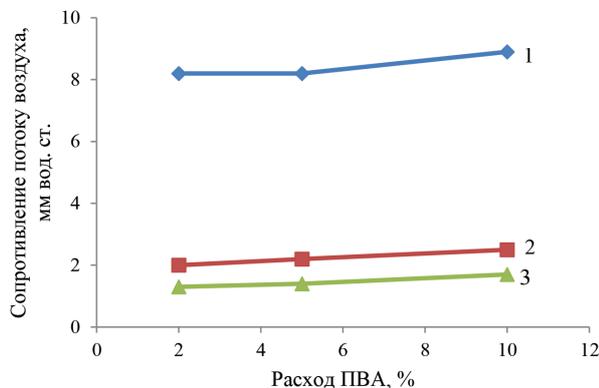
Таблица 1

**Влияние расхода ПВА на коэффициент проницаемости**

Расход связующего, %	Коэффициент проницаемости, %		
	МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
2	0,02	0,5	4,2
5	0,05	0,7	4,5
10	0,10	0,9	4,7

Рис. 3. Влияние расхода ПВА на сопротивление потоку воздуха для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 3. Influence of PVA consumption on air flow resistance for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60



Полученные результаты говорят о том, что с увеличением расхода связующего коэффициент проницаемости и сопротивление потоку воздуха изменяются незначительно. С уменьшением диаметра волокна сопротивление потоку воздуха увеличивается, а коэффициент проницаемости снижается. Это объясняется ростом плотности капиллярно-пористой структуры из-за уменьшения диаметра волокна.

Можно сделать вывод, что полученные образцы бумаги с расходом связующего 10 % применимы в качестве очищающих воздух фильтровальных материалов класса очистки ЕРА Е11 и ЕРА Е12, которые характеризуются коэффициентом проницаемости 5 и 0,5 % соответственно, сопротивлением потоку воздуха не более 10 мм вод. ст. и технологической прочностью не менее 0,4 МПа.

*Второй этап.* Влияние дисперсии ПЭ на образцы бумаги из стекловолокна оценивали по следующим показателям: прочности образцов, капиллярной

впитываемости, сопротивлению потоку воздуха и коэффициенту проницаемости. Зависимость предела прочности при растяжении от расхода связующего представлена на рис. 4.

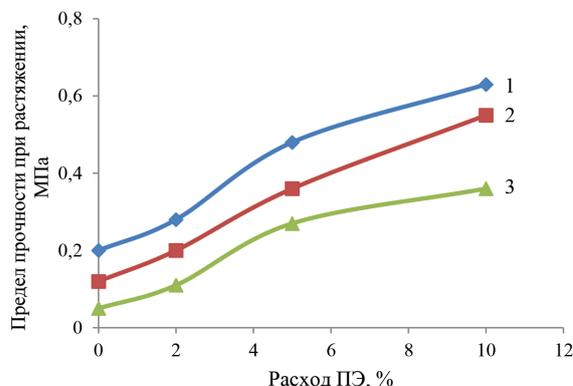


Рис. 4. Влияние расхода ПЭ на предел прочности при растяжении для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 4. Influence of PE consumption on tensile strength for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Как видно из рис. 4, с увеличением расхода ПЭ предел прочности при растяжении растет, что сопровождается уменьшением диаметра волокна, и достигает максимальных значений при расходе 10 % ПЭ: для УТВ-0,60 – 0,36 МПа, для МТВ-0,40 – 0,55 МПа, для МТВ-0,25 – 0,63 МПа.

На рис. 5 представлены результаты исследования влияния расхода водной дисперсии ПЭ на капиллярную впитываемость образцов стекловолнистой бумаги. С увеличением расхода связующего капиллярная впитываемость образцов изменяется незначительно. При этом с ростом диаметра волокна капиллярная впитываемость повышается. При расходе связующего 10 % она составляет для УТВ-0,60 – 186 мм, для МТВ-0,40 – 163 мм, для МТВ-0,25 – 118 мм. Характер полученных зависимостей можно объяснить особенностями капиллярно-пористой структуры образцов бумаги.

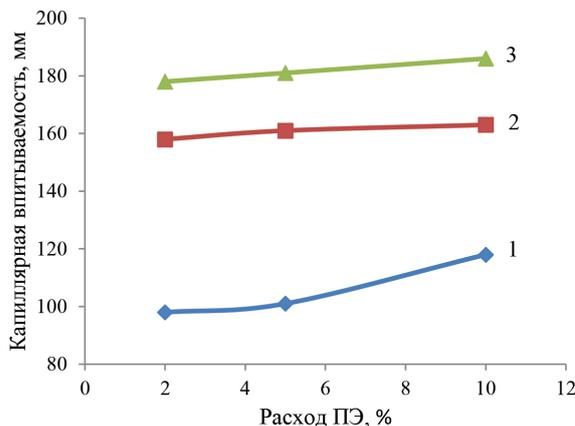


Рис. 5. Зависимость капиллярной впитываемости от расхода ПЭ для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 5. Dependence of capillary absorpency on PE consumption for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Данные о влиянии расхода связующего на коэффициент проницаемости и сопротивление потоку воздуха представлены в табл. 2 и на рис. 6 соответственно. С увеличением расхода связующего коэффициент проницаемости уменьшается. Если сравнить показатели по диаметрам волокон, то можно сделать вывод, что показатели существенно снижаются. Так, при расходе ПЭ 10 % коэффициент проницаемости для УТВ-0,60 составляет 1,2 %, для МТВ-0,40 – 0,02 %, для МТВ-0,25 – 0,0004 %. Сопротивление

потоку воздуха с увеличением расхода связующего увеличивается незначительно. Это объясняется формированием полиэтиленового пленочного покрытия при конечной сушке и более плотной структурой материала, образующейся с уменьшением диаметра волокна. Данные два фактора способствуют увеличению сопротивления потоку воздуха.

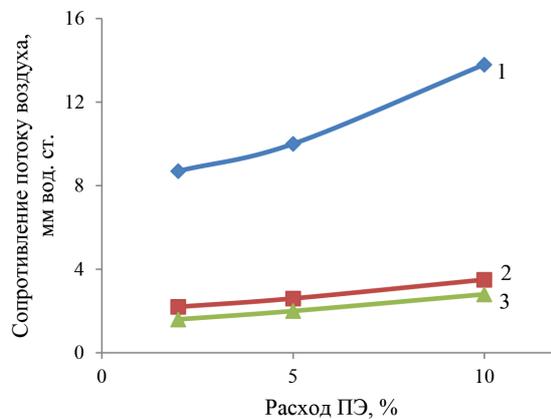
Таблица 2

**Зависимость коэффициента проницаемости от расхода ПЭ**

Расход связующего, %	Коэффициент проницаемости, %		
	МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
2	0,0006	0,06	1,8
5	0,0005	0,04	1,5
10	0,0004	0,02	1,2

Рис. 6. Зависимость сопротивления потоку воздуха от расхода ПЭ для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 6. Dependence of air flow resistance on PE consumption for fiber: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

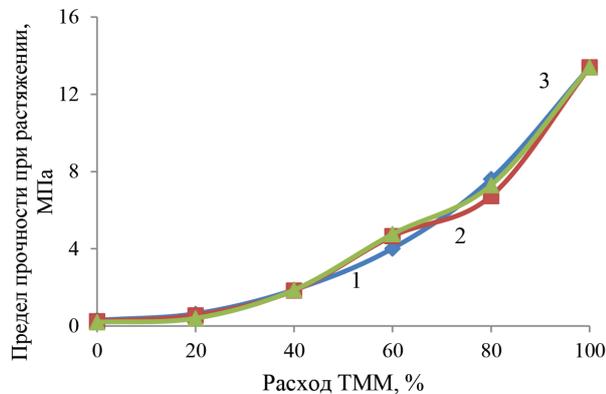


Фильтровальные материалы, получаемые при расходе связующего 5 и 10 % и при использовании в композиции волокон МТВ-0,25 и МТВ-0,40, могут быть применены для сверхвысокой очистки классов ULPA U15, HEPA H13.

*Третий этап.* Для изучения влияния волокон растительного происхождения на качество материала для фильтрации воздуха как связующее была использована ТММ. Исследовано влияние расхода ТММ на предел прочности при растяжении. Результаты показаны на рис. 7.

Рис. 7. Зависимость предела прочности при растяжении от расхода ТММ для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 7. Dependence of tensile strength on TMP consumption for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60



С увеличением расхода ТММ до 40 % предел прочности образцов бумаги независимо от диаметра волокна изменяется одинаково: возрастает от 0,2...0,3 до 1,8...1,9 МПа. При дальнейшем увеличении расхода связующего предел прочности возрастает резко. Так, при 60 % он составляет 4,0...4,7 МПа, а при 80 % – 6,7...7,6 МПа в зависимости от диаметра волокна. То есть ТММ является высокоэффективным связующим для стеклянных волокон различных диаметров, что объясняется наличием на поверхности волокон большого количества гидроксильных групп, способных образовывать водородные связи, которые становятся определяющими видами связей при формировании прочности бумаги.

Использование в качестве связующего сульфата алюминия, а именно полиядерных комплексов алюминия, которые образуются в результате гидролиза солей алюминия при активном регулировании рН среды, также дает большое увеличение гидроксильных групп, способствующих образованию водородных связей, а следовательно, и прочности образцов бумаги. Применение сульфата алюминия как неорганического связующего позволяет повысить барьерные свойства (термо-, хемо-, биостойкость) фильтровальных материалов при их использовании в агрессивных средах. Расход связующего варьировали от 5 до 30 %. Результаты представлены на рис. 8.

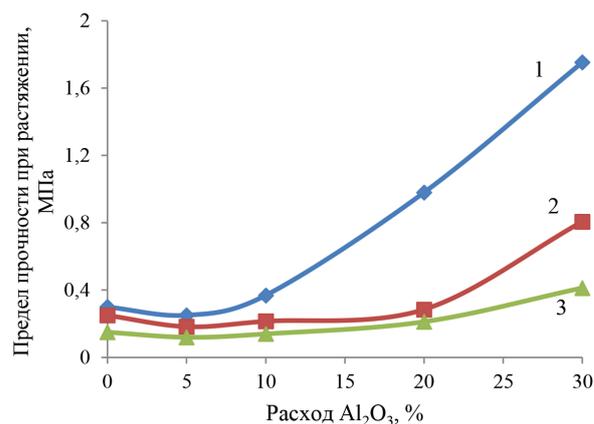


Рис. 8. Зависимость предела прочности при растяжении от расхода  $Al_2O_3$  для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 8. Dependence of tensile strength on  $Al_2O_3$  consumption for fiber: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

С увеличением расхода связующего до 20 % для волокон МТВ-0,40 и УТВ-0,60 и до 10 % для волокон МТВ-0,25 прочность не изменяется. При дальнейшем росте расхода связующего для волокон МТВ-0,40 и УТВ-0,60 предел прочности при растяжении увеличивается и составляет при расходе 30 % для МТВ-0,40 – 0,807 МПа, для УТВ-0,60 – 0,413 МПа. Для волокон МТВ-0,25 с ростом расхода от 10 до 30 % предел прочности значительно возрастает – от 0,369 до 1,753 МПа.

Также в рамках третьего этапа были проведены исследования сочетания в составе связующего ТММ и сульфата алюминия в композиции бумаги в зависимости от диаметра волокна. В качестве исследуемых композиций взяты следующие сочетания: 10 % сульфата алюминия и 50 % ТММ, 20 % сульфата алюминия и 40 % ТММ. Результаты представлены на рис. 9.

Использование в композиции сочетания связующих ТММ и сульфата алюминия существенно увеличивает прочность образцов. Так, при расходе ТММ 40 % прочность составляет порядка 1,8 МПа, а при 50 % ТММ – 3 МПа.

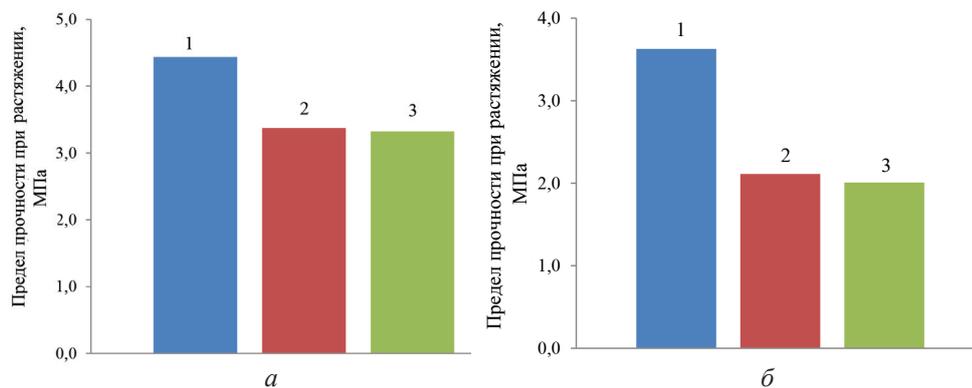


Рис. 9. Зависимость предела прочности от расхода смесей 40 % ТММ + 20 %  $Al_2(SO_4)_3$  (а) и 50 % ТММ + 10 %  $Al_2(SO_4)_3$  (б) для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 9. Dependence of tensile strength on consumption of a mixture of 40 % TMP + 20 %  $Al_2(SO_4)_3$  (a) and 50 % TMP + 10 %  $Al_2(SO_4)_3$  (b) for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

При расходе ТММ 40 и 50 % в сочетании с сульфатом алюминия 20 и 10 % соответственно для волокон МТВ-0,25 прочность составляет 4,4 и 3,6 МПа соответственно. Таким образом, сульфат алюминия проявляет синергизм по отношению к ТММ как связующему и в целом способствует увеличению прочности фильтровального материала.

Для оценки капиллярно-пористой структуры исследовано влияние расхода ТММ на капиллярную впитываемость (рис.10, а).

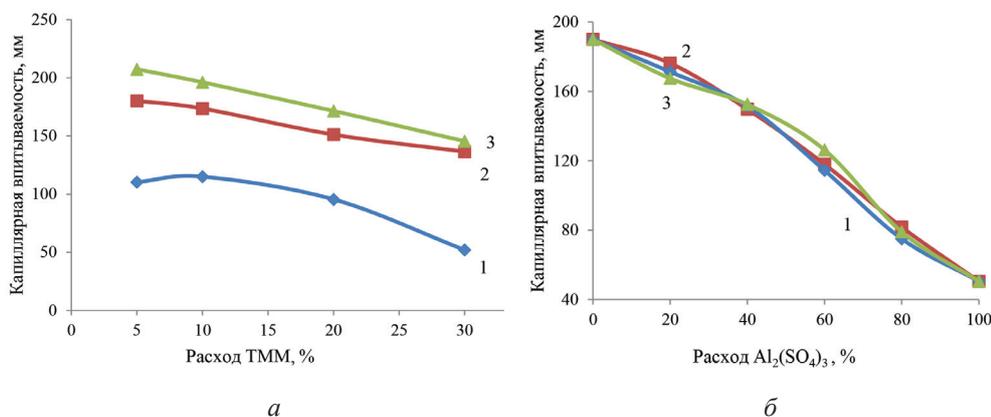


Рис. 10. Зависимость капиллярной впитываемости от расхода ТММ (а) и  $Al_2(SO_4)_3$  (б) для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 10. Dependence of capillary absorbency on consumption of TMP (a) and  $Al_2(SO_4)_3$  (b) for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

На рис. 10, б и 11 видно, что с увеличением расхода связующего капиллярная впитываемость существенно снижается. Это свидетельствует об образовании более плотной структуры бумаги. С увеличением расхода сульфата алюминия капиллярная впитываемость уменьшается и при расходе 30 % составляет

для МТВ-0,25 – 52 мм, для МТВ-0,40 – 136 мм, для УТВ-0,60 – 146 мм. Для композиции связующих ТММ + сульфат алюминия она возрастает с увеличением диаметра волокна.

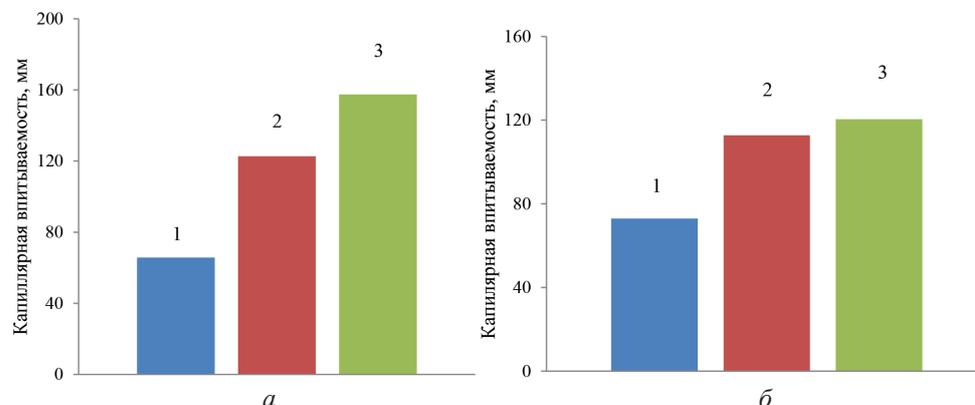


Рис. 11. Зависимость капиллярной впитываемости от расхода смесей 40 % ТММ + 20 %  $Al_2(SO_4)_3$  (а) и 50 % ТММ + 10 %  $Al_2(SO_4)_3$  (б) для волокон: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Fig. 11. Dependence of capillary absorbency on consumption of a mixture of 40 % TMP + 20 %  $Al_2(SO_4)_3$  (a) and 50 % TMP + 10 %  $Al_2(SO_4)_3$  (b) for fibers: 1 – МТВ-0,25; 2 – МТВ-0,40; 3 – УТВ-0,60

Для композиций, в качестве связующих в которых использованы ТММ, сульфат алюминия и их сочетания, были проведены исследования по влиянию расхода связующего на коэффициент проницаемости. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Влияние расхода и вида связующего на коэффициент проницаемости**

Связующее	Расход связующего, %	Коэффициент проницаемости, %		
		МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
ТММ	20	0,30	0,06	5,17
	40	0,01	0,43	6,33
	60	0,01	0,84	4,87
	80	0,01	1,17	4,47
	100	1,33		
Сульфат алюминия	5	2,30	3,20	5,01
	10	1,55	2,82	4,81
	20	1,35	1,62	4,13
	30	1,12	1,43	2,37
ТММ + сульфат алюминия	40 + 20 %	0,07	0,50	2,97
	50 + 10 %	0,05	0,40	1,33

С увеличением в композиции количества связующего ТММ до 60 % для волокон МТВ-0,25 коэффициент проницаемости уменьшается и составляет 0,01 %. В дальнейшем с увеличением расхода связующего коэффициент про-

ницаемости растёт. С увеличением в композиции количества связующего для волокон МТВ-0,40 коэффициент проницаемости становится больше, а для волокон УТВ-0,60 – меньше.

С увеличением в композиции количества сульфата алюминия коэффициент проницаемости уменьшается для волокон всех марок и возрастает в ряду МТВ-0,25 – МТВ-0,40 – УТВ-0,60. У смешанных композиций связующего коэффициент проницаемости возрастает с увеличением диаметра волокна и уменьшается с увеличением процентного содержания ТММ.

Представленные зависимости коэффициента проницаемости от расхода и вида связующего имеют достаточно сложный характер и обусловлены особенностями волокнистых полуфабрикатов и в целом капиллярно-пористой структурой фильтровальных материалов.

С увеличением в композиции количества связующего до 40 % для волокон МТВ-0,25, МТВ-0,40 и УТВ-0,60 сопротивление потоку воздуха уменьшается и составляет 8 мм вод. ст., 6 мм вод. ст. и 3 мм вод. ст. соответственно (табл. 4). В дальнейшем с увеличением расхода связующего сопротивление потоку воздуха растёт.

Таблица 4

**Влияние расхода и вида связующих на сопротивление потоку воздуха**

Связующее	Расход связующего, %	Сопротивление потоку воздуха, мм вод. ст.		
		МТВ-0,25	МТВ-0,40	УТВ-0,60
ТММ	20	11	26	27
	40	8	6	3
	60	23	17	8
	80	47	29	16
	100	66		
Сульфат алюминия	5	24	14	8
	10	42	35	19
	20	120	68	37
	30	182	103	51
ТММ + сульфат алюминия	40 + 20 %	194	39	21
	50 + 10 %	117	32	14

С увеличением содержания в композиции сульфата алюминия сопротивление потоку воздуха возрастает для волокон всех марок и в ряду УТВ-0,60 – МТВ-0,40 – МТВ-0,25. Для смешанных композиций связующего сопротивление потоку воздуха уменьшается с увеличением диаметра волокна и растёт с увеличением процентного содержания сульфата алюминия.

*Выводы*

1. С увеличением расхода связующего прочность при растяжении возрастает, фильтрующая способность сохраняется на требуемом уровне. С увеличением диаметра волокна предел прочности при растяжении снижается, фильтрующие характеристики ухудшаются.

2. Полученные образцы стекловолокнистой бумаги могут быть использованы в качестве фильтровальных материалов разных классов очистки.

3. Добавление в композицию термомеханической массы приводит к существенному увеличению прочности образцов, но при этом показатели капиллярной впитываемости снижаются.

4. Наилучшими характеристиками обладает композиция бумаги, в которой в качестве связующего использованы полиэтилен и волокна МТВ-0,25, МТВ-0,40: коэффициент проницаемости – 0,0004 и 0,02 %, сопротивление потоку воздуха – 14 и 4 мм вод. ст. соответственно. Полученный материал на основе стеклянных волокон можно применять как фильтрующий для очистки воздуха классов ULPA U15 и HEPA H13.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гурьев А.В., Дубовый В.К., Комаров В.И., Казаков Я.В. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона. СПб.: Политехн. ун-т, 2006. 229 с. Gur'yev A.V., Dubovoy V.K., Komarov V.I., Kazakov Ya.V. *Laboratory workshop on paper and cardboard technology*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2006. 229 p.

2. Загрязнение атмосферного воздуха: воздействие на здоровье // Всемирная организация здравоохранения. Режим доступа: <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/ru/> (дата обращения: 29.01.21). Atmospheric Air Pollution: Health Effects. *World Health Organization*.

3. Значение чистого воздуха для человека // Вент-очистка. Режим доступа: <https://xn----8sbemqmsj2age1d.xn--p1ai/news/znachenie-chistogo-vozdukha-dlya-cheloveka/> (дата обращения: 29.01.21). The Importance of Clean Air for Humans. *Vent-ochistka*.

4. Классификация воздушных фильтров для вентиляционных устройств: фильтры класса G, фильтры класса F, HEPA, ULPA // Brizex. Режим доступа: <https://xn--90aifdm6al.xn--p1ai/blog/klassifikacia-filtrov-dla-vent-ustrojstv-g-f-h-u> (дата обращения: 18.02.21). Classification of Air Filters for Ventilation Devices: Class G Filters, Class F Filters, HEPA, ULPA. *Brizex*.

5. Конструктивные типы воздушных фильтров // Классификация воздушных фильтров. Режим доступа: <https://teplo-spb.ru/stati/kak-vybrat/klassifikatsiya-vozdushnykh-filtrov.html#5> (дата обращения: 18.02.21) Design Types of Air Filters. *Classification of Air Filters*.

6. Лантев В.Н. Производство древесной массы / СПбГТУРП. СПб., 2009. 48 с. Laptev V.N. *Production of Wood Pulp*. Saint Petersburg, SPbSTUPP Publ., 2009. 48 p.

7. Оболенская А.В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с. Obolenskaya A.V. *Laboratory Work on the Chemistry of Wood and Cellulose*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 320 p.

8. Пестова Н.Ф. Производство древесной массы. Сыктывкар, 2013. 101 с. Pestova N.F. *Production of Wood Pulp*. Syktuyvkar, 2013. 101 p.

9. Свиридов Е.Б., Дубовый В.К. Книга о полимерах: свойства и применение, история и сегодняшний день материалов на основе высокомолекулярных соединений. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: САФУ, 2016. 392 с. Sviridov E.B., Dubovoy V.K. *The Book about Polymers: Properties and Application, History and Present Day of Materials Based on High-Molecular Compounds*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2016. 392 p.

10. Свиридов Е.Б., Щербак Н.В., Дубовой Е.В. Энергосберегающая экологически безопасная технология охлаждения воздуха аппаратами испарительного типа. СПб.: Политех. ун-т, 2017. 286 с. Sviridov E.B., Shcherbak N.V., Dubovoy E.V. *Energy-*

*Saving Environmentally Safe Technology of Air Cooling by Evaporative Type Devices*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2017. 286 p.

11. Смирнова Е.Г., Лоцманова Е.М., Журавлева Н.М., Резник А.С., Вураско А.В., Дрикер Б.Н., Минакова А.Н., Симонова Е.И., Сиваков В.П., Первова И.Г., Маслакова Т.И., Казаков Я.В., Севастьянова Ю.В., Коптяев В.В., Дернова Е.В., Канарский А.В., Дулькин Д.А., Щербак Н.В., Дубовый В.К. Материалы из нетрадиционных видов волокон: технологии получения, свойства, перспективы применения: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 252 с. Smirnova E.G., Lotsmanova E.M., Zhuravleva N.M., Reznik A.S., Vurasko A.V., Driker B.N., Minakova A.N., Simonova E.I., Sivakov V.P., Pervova I.G., Maslakova T.I., Kazakov Ya.V., Sevast'yanova Yu.V., Koptuyayev V.V., Dernova E.V., Kanarskiy A.V., Dul'kin D.A., Shcherbak N.V., Dubovyy V.K. *Materials from Non-Traditional Types of Fibers: Production Technologies, Properties and Application Prospects*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 252 p.

12. Смолин А.С., Криницин Н.А., Суслов Г.А. Исследование прочности сорбционных композиционных материалов на основе микротонких стеклянных волокон // Химические волокна. 2018. № 5. С. 18. Smolin A.S., Krinitsin N.A., Suslov G.A. The Study of the Strength of Sorption Composite Materials Based on Microfine Glass Fibers. *Khimicheskiye volokna* [Fibre Chemistry], 2018, no. 5, p. 18.

13. Смолин А.С., Щербак Н.В., Дубовой Е.В., Лоренгель М.А. Оценка эффективности очистки воздуха минеральноволокнистыми сепараторными бумагами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 126–134. Smolin A.S., Shcherbak N.V., Lorengel M.A., Dubovoy E.V. Estimating Efficiency of Air Cleaning by Mineral Fiber Separator Papers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 6, pp. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.126>

14. Стекловолокно: способ получения, свойства, применение // Helpiks.org. Режим доступа: <https://helpiks.org/8-90835.html> (дата обращения: 29.11.20). Glass Fiber: Method of production, Properties and Application. *Helpiks.org*.

15. Технологии производства базальтовых волокон // Basalt fiber & composite materials technology development. Режим доступа: <http://basaltm.com/tehnologii/technology-of-production-basalt-fiber.html> (дата обращения: 06.11.20). Basalt Fiber Production Technologies. *Basalt Fiber & Composite Materials: Technology Development*.

16. Типы стеклянных волокон // Sammas. Режим доступа: <http://sammas.ru/tehnologii-i-terminologiya/typy-steklyannykh-volokon.html> (дата обращения: 29.10.20). Types of Glass Fibers. *Sammas*.

17. Характеристика стекловолокна // АО «Новгородский завод стекловолокна». Режим доступа: <http://nzsv.ru/products/m20mtv0-25/> (дата обращения: 10.03.21). Characteristics of Glass Fiber. *AO "Novgorod Glass fiber Plant"*.

18. Чижов Г.И. Соединения алюминия в производстве бумаги: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1975. 320 с. Chizhov G.I. *Aluminum Compounds in Paper Production*: Dr. Eng. Sci. Diss. Leningrad, 1975. 320 p.

19. Щербак Н.В., Елукова Н.А. Влияние условий проведения испытания на прочность фильтровальной бумаги из стекловолокна // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова. Архангельск: САФУ, 2021. С. 389–392. Shcherbak N.V., Elukova N.A. Influence of Testing Conditions on the Strength of Glass Fiber Filter Paper. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 6th International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2021, pp. 389–392.

20. Щербак Н.В., Дубовой Е.В., Лоренгель М.А., Смолин А.С. Моделирование композиции сепараторной бумаги из минерального и растительного сырья для повышения прочности и впитывающей способности // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018.

№ 1. С. 120–129. Shcherbak N.V., Dubovoy E.V., Lorengel M.A., Smolin A.S. Simulation of Separator Paper Composition from Mineral and Vegetable Raw Material for Hardening and Absorbency. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 1, pp. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.120>

21. Binetruy C., Michaud V. Emerging, Hybrid & Smart Composites. *Functional Composite Materials*, 2021, vol. 2, art. 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42252-021-00028-y>

22. Moelter W., Fissan H. Structure of a High Efficiency Glass Fiver Filter Medium. *Aerosol Science and Technology*, 1997, vol. 27, iss. 3, pp. 447–461. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786829708965484>

23. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, vol. 33, iss. 13, pp. 1258–1275. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>

24. Thomas A.W. Solutions of Basic Salts of Aluminum. *Paper Trade Journal*, 1935, vol. 100, no. 6, pp. 36–39.

25. Zheng X.-M., Wang H.-Y. Effect of Fiber Diameter on the Structure and Properties of Glass Fiber Paper. *China National Pulp and Paper Research Institute*. 2016, vol. 35, pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.11980/j.issn.0254-508X.2016.05.004>

УДК 547.992.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-193-206

## ИССЛЕДОВАНИЕ НИТРОВАНИЯ СУЛЬФАТНОГО ЛИГНИНА АЦЕТИЛНИТРАТОМ В АПРОТОННЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

**Ю.Г. Хабаров, д-р хим. наук, проф.;** *ResearcherID:* [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>

**А.Ю. Гаркотин, аспирант;** *ResearcherID:* [AАН-6508-2020](https://orcid.org/0000-0002-2652-6188),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2652-6188>

**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>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: khabarov.yu@mail.ru

---

**Оригинальная статья** / Поступила в редакцию 18.10.20 / Принята к печати 14.01.21

---

**Аннотация.** Предложен метод нитрования сульфатного лигнина в гомогенных условиях: его обработка ацетилнитратом в 1,4-диоксане, тетрагидрофуране или диметилсульфоксиде. Изучено влияние продолжительности процесса и расхода ацетилнитрата на нитрование сульфатного лигнина. При нитровании сульфатного лигнина с помощью ацетилнитрата происходит изменение спектров ионизации, появляется новая обусловленная ароматическими нитрогруппами полоса поглощения с максимумом при 430 нм, интенсивность которой возрастает с увеличением расхода ацетилнитрата и продолжительности реакции. В то же время уменьшается интенсивность двух полос поглощения фенольных гидроксильных групп в области 230...300 нм. При наибольшем расходе ацетилнитрата 71 ммоль / г сульфатного лигнина фенольные полосы поглощения практически не проявляются на спектре ионизации, что, по-видимому, связано с ацетилированием. Для анализа спектров ионизации проведена их деконволюция. Полученные спектры могут быть описаны 3-5 гауссианами с погрешностью не более 5 %. Предложенный метод позволяет синтезировать нитрованный сульфатный лигнин с содержанием азота до 2,4 %. В зависимости от использованного апротонного растворителя кинетические кривые нитрования имеют различный вид. Особенностью нитрования сульфатного лигнина в среде тетрагидрофурана является наличие индукционного периода, продолжительность которого уменьшается с ростом температуры и который практически исчезает при температуре более 30 °С. Установлено, что уменьшить индукционный период можно, если в реакционную смесь вводить небольшие добавки нитритов. В диметилсульфоксиде нитрование сульфатного лигнина проходит с небольшой скоростью, значительно увеличивающейся в присутствии нитрита натрия.

**Для цитирования:** Хабаров Ю.Г., Гаркотин А.Ю., Вешняков В.А. Исследование нитрования сульфатного лигнина ацетилнитратом в апротонных растворителях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 193–206. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-193-206

**Благодарность:** При выполнении исследований было использовано оборудование ЦКП НО «Арктика» САФУ.

**Ключевые слова:** сульфатный лигнин, нитрование, ацетилнитрат, тетрагидрофуран, диметилсульфоксид, диоксан, электронная спектроскопия, апротонные растворители.

**STUDY OF KRAFT LIGNIN NITRATION WITH ACETYL NITRATE IN THE PRESENCE OF APROTIC SOLVENTS**

*Yuriy G. Khabarov, Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: [P-1802-2015](https://orcid.org/0000-0001-8392-0985).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8392-0985>*

*Anton Yu. Garkotin, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAH-6508-2020](https://orcid.org/0000-0002-2652-6188).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2652-6188>*

*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>*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: khabarov.yu@mail.ru

**Original article** / Received on October 18, 2020 / Accepted on January 14, 2021

**Abstract.** A method for homogeneous nitration of kraft lignin (KL), which consists in its treatment with acetyl nitrate in 1,4-dioxane, tetrahydrofuran, or dimethyl sulfoxide, has been proposed. The effects of reaction time and consumption of acetyl nitrate on KL nitration were studied. A new absorption band with a maximum at 430 nm due to aromatic nitro groups appears in the ionization spectra upon KL nitration. The intensity of this absorption band rises with an increase in consumption of acetyl nitrate and reaction time. At the same time, the intensities of two absorption bands of phenolic hydroxyl groups in the range of 230–300 nm decrease. At the highest acetyl nitrate consumption of 71 mmol / g KL, phenolic absorption bands are practically absent in the ionization spectrum of the products, which, apparently, can be explained by KL acetylation. To analyze the ionization spectra, they were deconvolved. The spectra of reaction products can be described by 3–5 Gaussians with an error of no more than 5 %. The proposed method makes it possible to synthesize the KL nitrated with nitrogen content of up to 2.4 %. Depending on the aprotic solvent used, the kinetic curves of nitration are different. A specific feature of KL nitration in tetrahydrofuran is the presence of an induction period, the duration of which decreases with increasing temperature and which practically disappears at temperatures above 30 °C. The introduction of small additions of nitrites into the reaction mixture makes it possible to reduce the induction period. The KL nitration in dimethyl sulfoxide occurs at a low rate that also increases significantly in the presence of sodium nitrite.

**For citation:** Khabarov Yu.G., Garkotin A.Yu., Veshnyakov V.A. Study of Kraft Lignin Nitration with Acetyl Nitrate in the Presence of Aprotic Solvents. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 2, pp. 193–206. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-193-206

**Acknowledgements:** The research was carried out with the support of the Shared Use of Equipment Center “Arktika” of the Northern (Arctic) Federal University (Arkhangelsk).

**Keywords:** kraft lignin, sulfate lignin, nitration, acetyl nitrate, tetrahydrofuran, dimethyl sulfoxide, dioxane, electron spectroscopy, aprotic solvents.

### *Введение*

В органической химии нитрование является важной реакцией, с помощью которой в промышленных условиях синтезируют разнообразные соединения: средства защиты древесины [31], красители, лекарственные препараты, ракетное топливо, взрывчатые вещества, нитрованные минеральные масла. Нитросоединения используются в качестве растворителей, при низкотемпературной депарафинизации дизельного топлива, для повышения октанового и це-

танового числа топлив [26]. Несмотря на полуторавековую историю изучения нитрования ароматических соединений, эта реакция привлекает внимание многих исследователей и в настоящее время.

Выбор нитрующих реагентов определяется свойствами нитруемого субстрата. Если нитруемое соединение обладает повышенной реакционной способностью, то нитрование можно проводить разбавленными растворами азотной кислоты. Для нитрования малоактивных соединений используют нитрующие смеси азотной и сильных кислот. Их применение требует больших затрат на утилизацию отработанных растворов, эти смеси обладают высокой коррозионной активностью по отношению к оборудованию и опасны для окружающей среды.

В фенолах гидроксильные группы являются электронодонорными заместителями, повышающими реакционную способность в реакциях электрофильного замещения, которые проходят преимущественно в *орто*- и *пара*-положениях. Получение смеси продуктов часто является нежелательным, поэтому развитие методов нитрования направленно на решение таких вопросов, в том числе и на увеличение его селективности. При нитровании фенолов нитратами металлов реакция проходит региоселективно [24, 36].

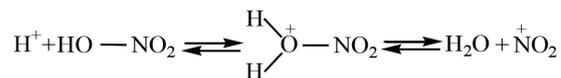
Кроме азотной кислоты в качестве нитрующих реагентов используют оксиды азота. Пентаоксид диазота позволяет проводить нитрование ароматических соединений с выходом, близким к количественному. Как катализатор применяют соединения железа(III). Преимуществом этого метода является отсутствие побочных окислительных процессов [8]. Каталитическим эффектом при нитровании фенола обладают азотистая кислота [6, 13, 14, 34], динитрозильные комплексы железа [33].

Фенол хорошо нитруется азотной кислотой в водно-этанольной среде. При нитровании фенола азотной кислотой в 1,4-диоксане с высоким выходом образуется исключительно 2,4-динитрофенол [3], а при избытке азотной кислоты в диметилсульфоксиде – пикриновая кислота [19].

Нитрование подразделяют на прямое и непрямое. В первом случае происходит замещение атома водорода на нитрогруппу или присоединение нитрогруппы по кратной связи. Во втором случае используют реакцию замещения функциональных групп или атомов (сульфо-, диазо-групп, галогенов) на  $\text{NO}_2$ -группу или трансформацию азотсодержащих групп (первичных аминогрупп по Генри [23, 28], нитрозо- или других групп [27, 32]) в нитрогруппу. С помощью палладиевых катализаторов протекает *иссо*-нитрование, при котором трифлатные и наофлатные группы, а также хлор замещаются на нитрогруппу [30]. Синтез пикриновой кислоты из фенол-2,4-дисульфокислоты происходит путем непрямого нитрования [12]. Нитроалканы можно синтезировать с помощью  $\text{S}_\text{N}$ -реакции галогеналканов с нитритом натрия в диметилформамиде [9, 10, 35].

Изучение механизма реакции является научной основой для разработки новых селективных методов нитрования. К настоящему времени установлено, что в электрофильном нитровании участвует изоэлектронный диоксиду углерода катион нитрония ( $\text{NO}_2^+$ ), который имеет плоское строение. Валентный угол O-N-O –  $180^\circ$ , атом азота находится в  $sp$ -, а атомы кислорода – в  $sp^2$ -гибридном состоянии [11]. В нитрующих смесях катион нитрония образуется в результате

протолиза азотной кислоты под действием серной кислоты, а в растворах азотной кислоты – в результате автопротолиза [17]:



Лигнины являются растительными ароматическими полимерами, в которых фенилпропановые структурные единицы (в основном гваяцил- и сирингилпропановые) соединены простыми эфирными и углерод-углеродными связями. Электронодонорные фенольные и метоксильные группы способствуют протеканию электрофильного нитрования лигнина. Кроме того, при взаимодействии с азотной кислотой проходят побочные окислительные превращения и образуются хинонные структуры и карбоксильные группы. Содержание азота в нитролигнинах обычно не больше 4 %.

Изучение нитрования лигносульфоновых кислот показало, что нитрованные производные приобретают свойства пептизатора. Это позволяет применять их при синтезе стабильных наноразмерных магнитных коллоидов на водной основе [2]. В водно-диоксановой среде под действием азотной кислоты быстро протекают нитрование и деполимеризация лигнина [18].

В отличие от лигносульфоновых кислот в структуре макромолекул сульфатного лигнина (СЛ) нет сульфогрупп, поэтому он растворяется только в водно-щелочных растворах. Из-за нерастворимости СЛ в воде и водных растворах кислот нитрование сульфатного лигнина не часто становилось предметом внимания ученых [7, 21, 25].

Нитрование технических лигнинов может быть проведено смесью азотной кислоты и этанола в соотношении 1 : 4 [20]. При гетерогенном нитровании щелочных лигнинов классическую нитрующую смесь добавляют маленькими порциями и весь процесс проводят ступенчато при различных температурах [15]. В водно-диоксановой среде СЛ нитруется азотной кислотой в гомогенных условиях [4].

Цель исследования – изучить нитрование СЛ ацетилнитратом в гомогенных условиях за счет применения апротонных растворителей.

#### *Объекты и методы исследования*

*Реактивы и материалы.* При выполнении исследований использованы реактивы квалификации х.ч.: концентрированные азотная (63 %), соляная и серная кислоты, тетрагидрофуран (ТГФ), диметилсульфоксид (ДМСО), 1,4-диоксан (диоксан), NaOH, NaCl и уксусный ангидрид. СЛ был выделен из производственного черного щелока от варки хвойной древесины и освобожден от водо- и эфирорастворимых веществ. Элементный состав СЛ (%): С (66,1), Н (6,1), S (1,3), О (26,4). Готовили растворы СЛ с концентрацией 58 мг/мл в ТГФ, ДМСО и диоксане.

*Методика синтеза ацетилнитрата.* При охлаждении готовили смесь в соотношении 1 : 4 (по объему) из концентрированной  $\text{HNO}_3$  и уксусного анги-

дрида. Продолжительность реакции при комнатной температуре – 30 мин [22]. Полученный раствор ацетилнитрата использовали в дальнейшей работе без дополнительного выделения и очистки.

*Методика нитрования сульфатного лигнина.* Реакцию проводили при комнатной температуре в стеклянном микрореакторе при постоянном перемешивании на магнитной мешалке. К 5 мл раствора СЛ добавляли заданный объем раствора ацетилнитрата и выдерживали реакционную смесь в течение 1...30 мин. Для выделения продуктов нитрования СЛ (нитрование в течение 30 мин) их высаливали насыщенным раствором NaCl из реакционной среды, промывали несколько раз 1 %-м раствором HCl на центрифуге (5000 об./мин, 5 мин) и сушили в вакуум-эксикаторе.

Для изучения кинетики нитрование СЛ в ТГФ проводили в термостате при температуре от 15,3 до 30,6 °С. Через заданные промежутки времени отбирали пробы реакционной смеси и измеряли оптическую плотность при 430 нм.

*Методика определения оптической плотности.* Оптическую плотность при 430 нм измеряли на фотометре «Эксперт-003» (Россия) относительно дистиллированной воды в кюветах с толщиной рабочего слоя 10 мм. Для этого через заданные промежутки времени в калиброванные пробирки с 2 мл 1 М раствора NaOH вносили 0,1 мл реакционной смеси и объем раствора доводили водой до 25 мл (исходный раствор).

*Методика регистрации электронных спектров.* Регистрацию электронных спектров проводили относительно дистиллированной воды в кварцевых кюветах с толщиной рабочего слоя 10 мм на спектрометре Shimadzu UV-1650PC (Япония) при 230...500 нм. Перед регистрацией спектров 0,1 мл реакционной смеси разбавляли в 1250 раз.

*Методика регистрации электронных спектров ионизации.* Регистрацию спектров ионизации продуктов нитрования СЛ осуществляли на спектрофотометре Shimadzu UV-1650PC (Япония) в области длин волн 230...500 нм, используя кварцевые кюветы с толщиной рабочего слоя 10 мм. В 2 калиброванные пробирки вносили по 2 мл исходного раствора. После чего объемы растворов доводили до 25 мл: в одной пробирке – 0,1 М раствором H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, во второй – 0,1 М раствором NaOH. Кислый раствор помещали в кювету сравнения, а щелочной – в рабочую кювету и записывали спектр ионизации.

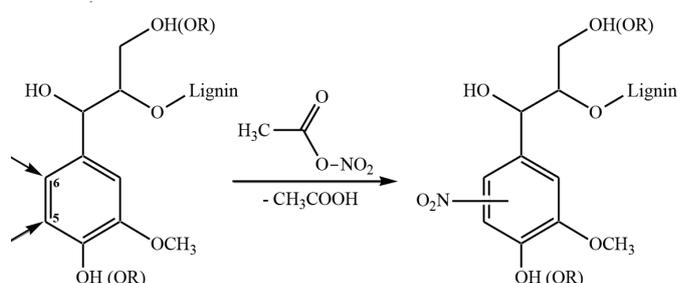
*Методика элементного анализа.* Элементный анализ исходного СЛ и выделенных образцов нитрованного СЛ проводили на элементном анализаторе EuroEA-3000 (EuroVector, Италия).

*Методика регистрации ИК-спектров.* ИК-спектры записывали в диапазоне 4000...400 см<sup>-1</sup> на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu FTIR-8400S (Япония) с помощью НПВО-приставки с однократным отражением MIRacle (PikeTech, США). Результаты измерения подвергали ATR-коррекции.

### *Результаты исследования и их обсуждение*

Чтобы уменьшить окислительное действие нитрующего реагента на СЛ, был использован ацетилнитрат – смешанный ангидрид уксусной и азотной кислот. Применение апротонных растворителей, таких как диоксан, ДМСО и ТГФ, позволило провести нитрование СЛ в гомогенных условиях.

При нитровании СЛ проходит реакция электрофильного замещения атомов водорода ароматического ядра на нитрогруппу. Основным структурным элементом хвойного СЛ – гваяцильная фенилпропановая единица, в которой при электрофильном замещении могут замещаться три атома водорода. Функциональные группы (-ОН, -ОСН<sub>3</sub>) являются электронодонорными и в основном определяют местоположение вводимой нитрогруппы. Известно [5], что в гваяцильных структурах со свободной фенольной ОН-группой нитрование преимущественно происходит в положении 5, а в случае этерифицированных структур – в положении 6:



Для контроля хода реакции использовали электронную спектроскопию. Введение нитрогруппы в ароматическое ядро фенольных соединений, в том числе и лигнинов, приводит к появлению на электронных спектрах полосы поглощения при 430 нм. Более содержательными являются спектры ионизации, также называемые дифференциальными спектрами. Увеличение рН раствора вещества, способного к ионизации, приводит к изменению спектра. Спектр ионизации получают путем вычитания из спектра, записанного в щелочной среде, спектра, записанного в кислой среде [16].

*Влияние расхода ацетилнитрата.* Одним из важных факторов нитрования СЛ является расход ацетилнитрата. Для определения влияния расхода ацетилнитрата на протекание реакции в диоксане был проведен опыт, в котором изменяли объем ацетилнитрата от 0,25 до 1,5 мл (табл. 1). Запись спектров осуществляли по методике регистрации электронных спектров ионизации. Спектры ионизации в зависимости от расхода ацетилнитрата представлены на рис. 1.

Таблица 1

**Исходные данные для изучения влияния расхода ацетилнитрата**

Показатель	Вариант				
	1	2	3	4	5
Раствор ацетилнитрата, мл	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50
Количество ацетилнитрата, ммоль	3,5	6,9	10,4	13,8	20,7
Добавка диоксана в раствор ацетилнитрата, мл	1,25	1,00	0,75	0,50	0
Диоксан, необходимый для растворения СЛ, мл	5,00				
Навеска СЛ, мг	290	292	290	291	289
Продолжительность реакции, мин	10				

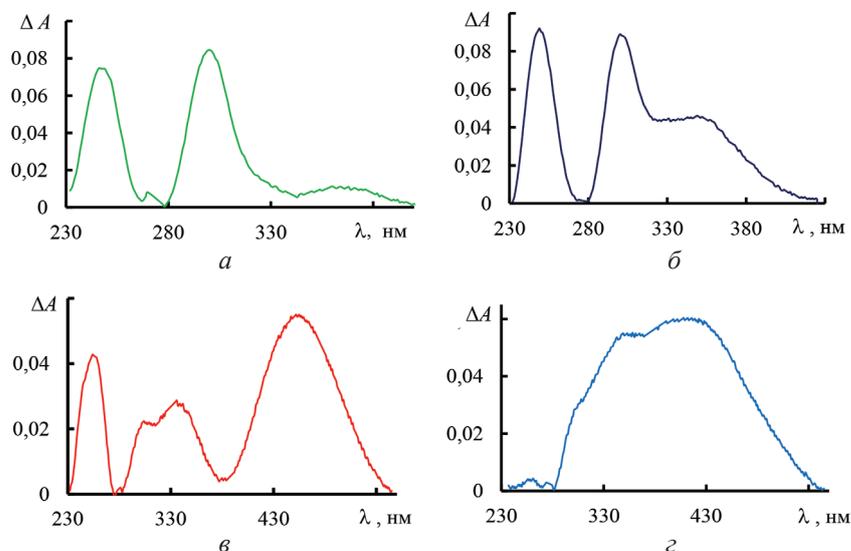


Рис. 1. Спектры ионизации СЛ – исходного (а) и нитрованного с расходом ацетилнитрата 12 (б), 24 (в) и 71 ммоль / г СЛ (г)

Fig. 1. Ionization spectra of the initial KL (a) and KLs nitrated with the consumption of acetyl nitrate 12 (б), 24 (в) and 71 mmol / g KL (г)

Как видно, при расходе ацетилнитрата 12 ммоль / г СЛ на спектре ионизации в отличие от спектра ионизации исходного СЛ образуется новое плечо в области 330...350 нм. Возможно, это связано с появлением сопряженных карбонильных групп. При увеличении расхода ацетилнитрата в диапазоне 24...48 ммоль / г СЛ наблюдается новая полоса поглощения с максимумом при 430 нм. Это свидетельствует о том, что в данных условиях происходит нитрование СЛ. Также можно отметить, поглощение при длинах волн 250 и 300 нм, связанное с поглощением фенольных гидроксильных групп, систематически снижается с увеличением расхода ацетилнитрата. При наибольшем расходе ацетилнитрата (71 ммоль / г СЛ) спектр ионизации сильно изменен, практически отсутствуют полосы поглощения при 250 и 300 нм, спектр ионизации представляет собой контур из сильно перекрытых полос поглощения.

Так как спектры ионизации в области 300...500 нм являются аддитивными из перекрывающихся полос поглощения, то представляло интерес выделить индивидуальные полосы поглощения. Для этого провели деконволюцию спектров ионизации. В качестве модели индивидуальной полосы поглощения использовали кривую Гаусса. Спектр ионизации нитрованного СЛ при расходе ацетилнитрата 71 ммоль / г СЛ хорошо описывается 5 перекрывающимися полосами поглощения с максимумами при 300, 317, 336, 368 и 433 нм, интенсивности полос максимумов составили 0,021; 0,016; 0,025; 0,044; 0,052 соответственно. Наибольшую интенсивность имеет полоса поглощения при 433 нм, обусловленная нитрогруппами. Полосы поглощения при 250 нм на спектре ионизации в этом случае практически не наблюдаются (рис. 1, г).

*Влияние продолжительности реакции.* Продолжительность реакции является одним из важных факторов, влияющих на нитрование СЛ. Зависимость

спектров ионизации от продолжительности реакции показана на рис. 2. Приведенные данные свидетельствуют о высокой скорости нитрования. Расход ацетилнитрата составил 36 ммоль / г СЛ. Полоса поглощения при 430...450 нм появляется через 30 с. В коротковолновой области наблюдается изменение характера спектральной кривой, по-видимому, это обусловлено появлением новой полосы поглощения при 260 нм и снижением интенсивностей полос поглощения фенольной ОН-группы и при 250 нм, и при 300 нм. Основные процессы, как видно, протекают в течение первых 2...5 мин. После 2 мин изменения спектров ионизации незначительны (спектр 6). Причиной уменьшения интенсивности полос поглощения фенольных гидроксильных групп, возможно, является участие их в реакции ацетилирования.

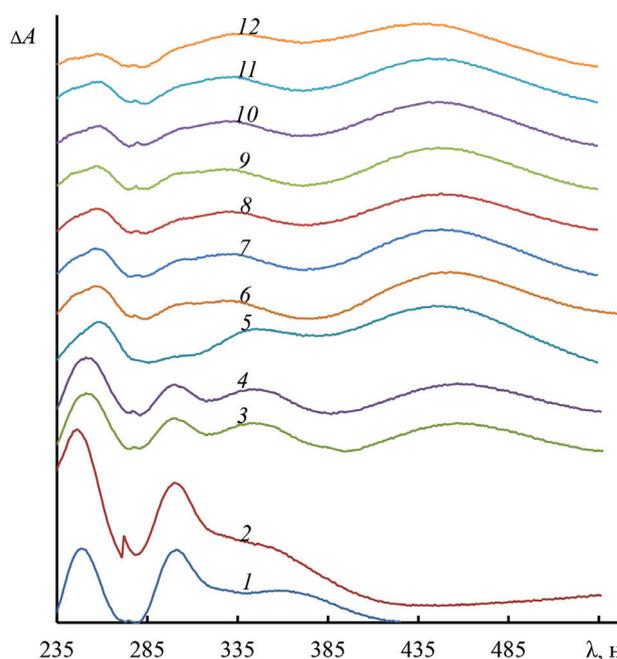


Рис. 2. Спектры ионизации, полученные при различной продолжительности нитрования СЛ ацетилнитратом в диоксане, с: исходный СЛ (1), 15 (2), 30 (3), 70 (4), 90 (5), 120 (6), 150 (7), 180 (8), 210 (9), 240 (10), 300 (11), 600 (12)

Fig. 2. Ionization spectra of the KL nitrated with acetyl nitrate in dioxane at different reaction times, s: the initial KL (1), 15(2), 30(3), 70(4), 90(5), 120(6), 150(7), 180(8), 210(9), 240(10), 300(11), and 600(12)

Для изучения влияния вида апротонного растворителя на протекание нитрования СЛ ацетилнитратом проведены эксперименты с использованием ТГФ, ДМСО и диоксана. Условия нитрования были одинаковыми. Результаты представлены в виде кинетических кривых (рис. 3), отражающих изменения оптической плотности при длине волны 430 нм. Как видно из кинетических кривых, реакция нитрования СЛ в различных апротонных растворителях протекает по-разному, что, скорее всего, обусловлено их строением и сольватационными эффектами. Наиболее быстро реакция проходит в диоксане, а в ДМСО

оптическая плотность с течением времени не меняется. В ТГФ кинетическая кривая нитрования имеет сигмоидный характер: оптическая плотность при 430 нм начинает быстро увеличиваться после 2 мин и через 3...4 мин выходит на плато. Максимальные значения оптической плотности при 430 нм в случае нитрования в диоксане и ТГФ практически одинаковые.

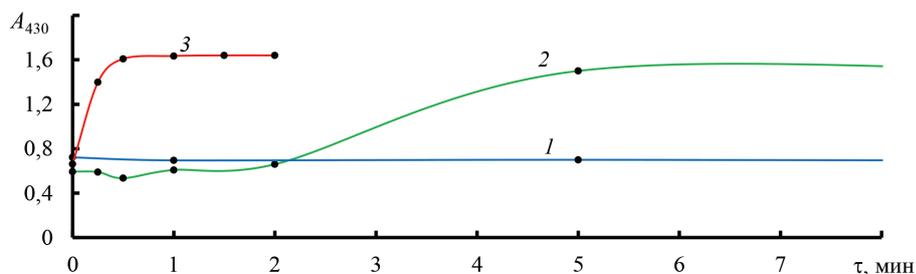


Рис. 3. Зависимость оптической плотности при 430 нм от продолжительности реакции в ДМСО (1), ТГФ (2), диоксане (3)

Fig. 3. Dependence of absorbance at 430 nm on the duration of KL nitration in DMSO (1), THF (2) and dioxane (3)

*Выделение продуктов нитрования сульфатного лигнина.* СЛ хорошо растворяется в щелочных водных растворах и выделяется в осадок при их подкислении. Изучение нитрования СЛ ацетилнитратом проводили в безводной среде с использованием апротонных растворителей (диоксан, ДМСО, ТГФ). Известно, что СЛ растворяется также в смесях этих растворителей с водой. Поэтому для достижения максимальной степени осаждения использовали растворы хлорида натрия различных концентраций.

Чтобы оценить влияние водного раствора NaCl на выделение нитрованного СЛ из реакционной смеси, были проведены опыты, в которых использовали растворы NaCl различной концентрации, приготовленные из насыщенного раствора NaCl и дистиллированной воды.

Все спектры надосадочных жидкостей, полученных при выделении продуктов нитрования СЛ растворами NaCl, представляют собой ниспадающие линии с плечом около 325 нм. На рис. 4 приведена зависимость оптической плотности при 280 нм надосадочной жидкости от концентрации раствора NaCl. Представленную на рисунке кривую можно условно разделить на три участка: на первом оптическая плотность снижается с 3,2 до 1,8; на втором (концентрация хлорида натрия 7...17 %) слабо зависит от концентрации; на третьем снижается до 0,65. Поэтому для выделения нитрованного СЛ использовали насыщенный раствор NaCl.

Рис. 4. Зависимость оптической плотности при 280 нм надосадочной жидкости от концентрации раствора NaCl, использованного для выделения нитрованного СЛ

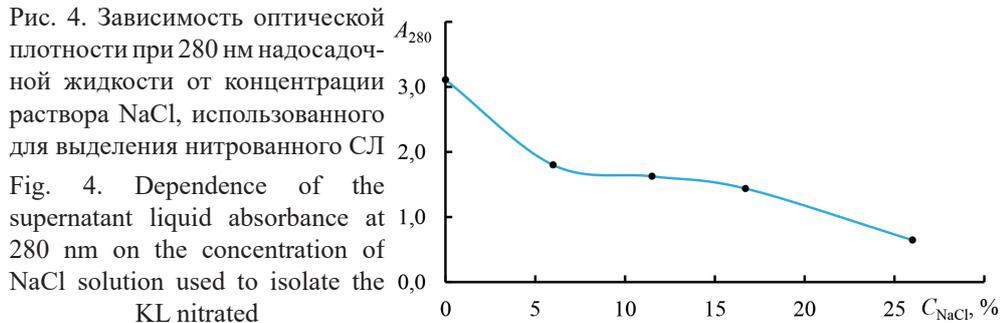


Fig. 4. Dependence of the supernatant liquid absorbance at 280 nm on the concentration of NaCl solution used to isolate the

KL nitrated

*Изучение кинетики нитрования в тетрагидрофуране.* Для изучения кинетики нитрования СЛ в ТГФ реакцию проводили в термостате, нагретом от 15,3 до 30,6 °С. Через заданные промежутки времени отбирали пробы реакционной смеси и определяли оптическую плотность при 430 нм. Полученные кинетические кривые представлены на рис. 5.

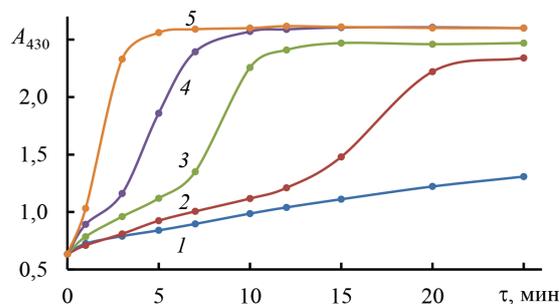


Рис. 5. Зависимость оптической плотности при 430 нм от продолжительности реакции нитрования СЛ ацетилнитратом в ТГФ при 15,3 (1); 19,3 (2); 22,5 (3); 25,8 (4); 30,6 °С (5)  
Fig. 5. Dependence of the absorbance at 430 nm on the duration of KL nitration with acetyl nitrate in THF at 15.3 (1); 19.3 (2); 22.5 (3); 25.8 (4); and 30.6 °С (5)

Как видно из рис. 5, нитрование СЛ в зависимости от температуры проходит по-разному. В ТГФ нитрование начинается не сразу. Нитрование СЛ при 15,3 °С идет с небольшой скоростью. При температурах 19,3; 22,5 и 25,8 °С на кинетических кривых наблюдается индукционный период, после которого реакция проходит быстро, в течение 2...5 мин. На рис. 6 видно, что при увеличении температуры реакции уменьшается продолжительность индукционного периода. При температуре 30,6 °С индукционный период на кинетической кривой отсутствует.

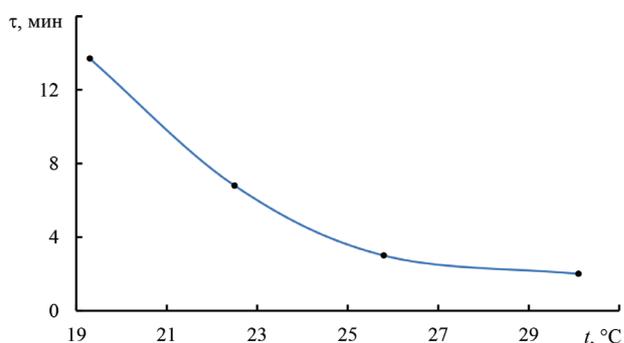


Рис. 6. Зависимость продолжительности индукционного периода от температуры нитрования СЛ ацетилнитратом в ТГФ  
Fig. 6. Dependence of the induction period duration (min) on the temperature of KL nitration with acetyl nitrate in THF

Зависимость логарифма константы скорости реакции нитрования СЛ ацетилнитратом в ТГФ на активном участке от обратной термодинамической температуры описывается полиномом 1-го порядка ( $\ln V = -8385,50/T + 27,175$ ;  $R^2 = 0,94$ ).

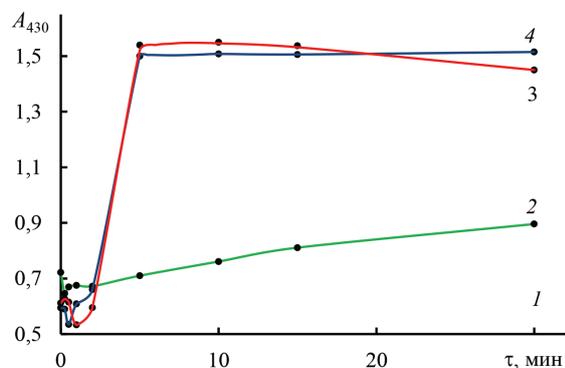
Сигмоидный характер кинетической кривой нитрования СЛ в ТГФ может быть объяснен автокатализом, при котором в качестве катализатора выступает один из продуктов реакции или исходное вещество. Например, из литературы известно [6, 29, 34], что ускоряющее действие на нитрование ароматических соединений оказывает азотистая кислота, поэтому в дальнейшем было изучено влияние добавки нитрита натрия на нитрование СЛ.

*Влияние добавки  $\text{NaNO}_2$  на нитрование в диметилсульфоксиде и тетрагидрофуране.* Кинетические кривые нитрования СЛ в ТГФ и ДМСО с добавкой нитрита натрия и без нее представлены на рис. 7. Как видно из кинетических

кривых, нитрование СЛ в ДМСО проходит медленнее, чем в ТГФ. Добавка  $\text{NaNO}_2$  в ДМСО увеличивает скорость нитрования СЛ. На нитрование в ТГФ добавка нитрита натрия не оказывает сильного воздействия.

Рис. 7. Кинетические кривые нитрования СЛ ацетилнитратом без  $\text{NaNO}_2$  в ДМСО (1) и ТГФ (3), а также с добавкой  $\text{NaNO}_2$  (10 % от СЛ) в ДМСО (2) и ТГФ (4)

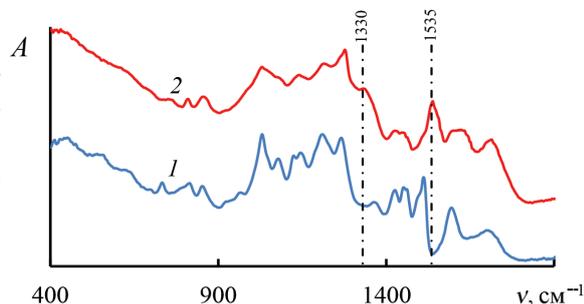
Fig. 7. Kinetic curves of KL nitration with acetyl nitrate without  $\text{NaNO}_2$  in DMSO (1) and THF (3), as well as with the addition of  $\text{NaNO}_2$  (10 % of KL) in DMSO (2) and THF (4)



*ИК-спектры продуктов нитрования сульфатного лигнина.* При электрофильном нитровании СЛ в макромолекулах нитрованного СЛ появляются нитрогруппы, связанные с ароматическим ядром фенилпропановых единиц. На это указывают ИК-спектры, приведенные на рис. 8. Как видно, после нитрования на спектре нитрованного СЛ появляются новые полосы поглощения при  $1330$  и  $1535$   $\text{cm}^{-1}$ , характерные для ароматических нитросоединений [1].

Рис. 8. ИК-спектры исходного СЛ (1) и продуктов его нитрования в диоксане (2)

Fig. 8. IR spectra of the initial KL (1) and the KL nitrated in dioxane (2)



*Элементный анализ.* Результаты определения элементного состава исходного СЛ и продуктов его нитрования ацетилнитратом представлены в табл. 2.

Таблица 2

Элементный анализ исходного сульфата лигнина и продуктов его нитрования

СЛ	Содержание элемента, %		
	С	Н	Н
Исходный	65,8	0	6,2
Нитрованный в растворителях:			
Диоксан	51,9	2,4	4,3
ДМСО	62,0	1,1	5,4
ДМСО с добавкой $\text{NaNO}_2$	59,8	1,8	5,1
ТГФ	50,9	1,7	5,4

Из табл. 2 видно, что в одинаковых условиях нитрование лучше проходит в диоксане. При нитровании СЛ в ДМСО добавка нитрита натрия приводит к увеличению содержания N от 1,1 до 1,8 %. Такая степень нитрования СЛ в ТГФ достигается без добавки нитрита натрия.

#### Заключение

Предложен новый метод нитрования сульфатного лигнина в гомогенных условиях. Изучено влияние продолжительности процесса и расхода ацетилнитрата на нитрование сульфатного лигнина в диоксане. Показано, что с увеличением расхода ацетилнитрата наблюдается систематическое изменение спектров ионизации, появляется новая полоса поглощения с максимумом при 430 нм, обусловленная нитрогруппами. Интенсивность этой полосы возрастает с увеличением расхода ацетилнитрата и продолжительности реакции нитрования. В то же время уменьшается интенсивность двух полос поглощения фенольных гидроксильных групп в области 230...300 нм. При наибольшем расходе ацетилнитрата 71 ммоль / г сульфатного лигнина эти полосы практически не проявляются на спектре ионизации, что, по-видимому, может быть связано с ацелированием фенольных ОН-групп. Особенностью нитрования сульфатного лигнина в среде тетрагидрофурана является наличие индукционного периода, продолжительность которого уменьшается с увеличением температуры нитрования. В диметилсульфоксиде нитрование сульфатного лигнина проходит с небольшой скоростью, которая значительно возрастает в присутствии добавки нитрита натрия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беллами Л. Инфракрасные спектры молекул. М.: Иностран. лит., 1957. 444 с. Bellamy L.J. *The Infra-red Spectra of Complex Molecules*. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1957. 444 p.
2. Хабаров Ю.Г., Бабкин И.М., Вешняков В.А. Синтез магнитоактивного соединения на основе сульфата железа(II) // Журн. приклад. химии. 2012. Т. 85, вып. 6. С. 900–905. Khabarov Yu.G., Babkin I.M., Veshnyakov V.A. The Influence of the Nitrosation Conditions of Lignosulfonates on the Synthesis of Magnetoactive Compound. *Zhurnal Prikladnoy Khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2012, vol. 85, iss. 6, pp. 900–905.
3. Хабаров Ю.Г., Лахманов Д.Е., Косяков Д.С., Ульяновский Н.В. Синтез 2,4-динитрофенола // Журн. приклад. химии. 2012. Т. 85, № 10. С. 1644–1647. Khabarov Yu.G., Lakhmanov D.E., Kosyakov D.S., Ul'yanovskii N.V. Synthesis of 2,4-Dinitrophenol. *Zhurnal Prikladnoy Khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2012, vol. 85, no. 10, pp. 1644–1647.
4. Хабаров Ю.Г., Кузяков Н.Ю., Вешняков В.А., Комарова Г.В., Гаркотин А.Ю. Исследование нитрования сульфатного лигнина в гомогенных условиях с помощью электронной спектроскопии // Изв. АН. Сер.: Химическая. 2016. № 12. С. 2925–2931. Khabarov Yu.G., Kuzyakov N.Yu., Veshnyakov V.A., Komarova G.V., Garkotin A.Y. Nitration of Sulfate Lignin under Homogeneous Conditions Studied by Electron Spectroscopy. *Izvestiya Akademii Nauk, Seriya Khimicheskaya* [Russian Chemical Bulletin], 2016, no. 12, pp. 2925–2931.

5. Шорыгина Н.Н., Резников В.М., Елкин В.В. Реакционная способность лигнина. М.: Наука, 1976. 368 с. Shorygina N.N., Reznikov V.M., Elkin V.V. *The Reactivity of Lignin*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 368 p.
6. Al-Obaidi U., Moodie R.B. The Nitrous Acid-Catalysed Nitration of Phenol. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 1985, iss. 3, pp. 467–472. DOI: <https://doi.org/10.1039/p29850000467>
7. Andersson L., Samuelson O. Demethylation and Nitration of Lignin. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 1985, vol. 5, iss. 3, pp. 363–378. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773818508085199>
8. Bak R.R., Smallridge A.J. A Fast and Mild Method for the Nitration of Aromatic Rings. *Tetrahedron Letters*, 2001, vol. 42, iss. 38, pp. 6767–6769. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(01\)01378-8](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(01)01378-8)
9. Ballini R., Barboni L., Giarlo G. The First Conversion of Primary Alkyl Halides to Nitroalkanes under Aqueous Medium. *The Journal of Organic Chemistry*, 2004, vol. 69, iss. 20, pp. 6907–6908. DOI: <https://doi.org/10.1021/jo049048b>
10. Ballini R., Barboni L., Palmieria A. Improved Chemoselective, Ecofriendly Conditions for the Conversion of Primary Alkyl Halides into Nitroalkanes under PEG400. *Green Chemistry*, 2008, vol. 10, iss. 9, pp. 1004–1006. DOI: <https://doi.org/10.1039/b805985c>
11. Cotton F.A., Wilkinson G., Murillo C.A., Bochmann M. *Advanced Inorganic Chemistry*. New York, Wiley, 1999. 1376 p.
12. Dimiev A.M., Kargin Yu.M. Sulfonation and ipso Substitution in the Course of Nitration of Aromatic Compounds in the System  $N_2O_5$ - $SO_3$ - $H_2O$ . *Russian Journal of General Chemistry*, 1996, vol. 66, no. 11, pp. 1831–1836.
13. Dix L.R., Moodie R.B. Nitrosation and Nitrous Acid-Catalysed Nitration of Anisole and 2,6-Dimethylanisole. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 1986, no. 7, pp. 1097–1101. DOI: <https://doi.org/10.1039/p29860001097>
14. Dugar A., Kumar A., Ameta R., Ameta S.C. A Green Chemical Approach for Nitration of Aromatic Compounds. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2009, vol. 28, no. 2, pp. 163–168. DOI: <https://doi.org/10.20450/mjcc.2009.206>
15. Fuchs W. *Die Chemie des Lignins*. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1926. 327 S. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-91583-3>
16. Goldschmid O. The Effect of Alkali and Strong Acid on the Ultraviolet Absorption Spectrum of Lignin and Related Compounds. *Journal of the American Chemical Society*, 1953, vol. 75, no. 15, pp. 3780–3783. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01111a052>
17. Kent J.A. *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. New York, Springer, 2012. 1562 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4259-2>
18. Khabarov Yu.G., Lakhmanov D.E. Depolymerization of Condensed Lignins under the Influence of Nitric Acid. *Proceedings of the 13th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*. Seville, Spain, 2014, pp. 459–462.
19. Khabarov Yu.G., Patrakeevev A.A., Veshnyakov V.A., Kosyakov D.S., Ul'yanovskii N.V., Garkotin A.Yu. One-Step Synthesis of Picric Acid from Phenol. *Organic Preparations and Procedures International*, 2017, vol. 49, no. 2, pp. 178–181. DOI: <https://doi.org/10.1080/00304948.2017.1291008>
20. Kurschner K. From Nitrolignin to Lignin. *Zellstoff-Faser*, 1935, vol. 32, pp. 87–93.
21. Lindberg O., Walding J. Reactions of Nitrated Kraft Lignin in an Alkaline Oxygen Bleaching Stage. *Tappi Journal*, 1987, vol. 70, no. 10, pp. 119–123.
22. Louw R. Acetyl Nitrate. *Encyclopedia of Reagents for Organic Synthesis*. Wiley, 2001. 2 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/047084289X.ra032>
23. Luzzio F.A. The Henry Reaction: Recent Examples. *Tetrahedron*, 2001, vol. 57, iss. 6, pp. 915–945. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(00\)00965-0](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(00)00965-0)

24. Nowrouzi N., Mehranpour A.M., Bashiri E., Shayan Z. Aromatic Nitration under Neutral Conditions Using N-Bromosuccinimide/Silver(I) Nitrate. *Tetrahedron Letters*, 2012, vol. 53, iss. 36, pp. 4841–4842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2012.06.126>
25. Ohi H., Kishino M. Cleavage of C $\alpha$ -C $\beta$  Bonds of Lignin Model Compounds by Nitrite and Nitric Acid. *Holzforschung*, 1997, vol. 51, iss. 4, pp. 343–348. DOI: <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.4.343>
26. Olah G.A., Malhotra R., Narang S.C. *Nitration. Methods and Mechanisms*. Weinheim, VCH Publishers, 1989. 330 p.
27. Ono N. *The Nitro Group in Organic Synthesis*. New York, Wiley-VCH, 2001. 372 p.
28. Palomo C., Oiarbide M., Mielgo A. Unveiling Reliable Catalysts for the Asymmetric Nitroaldol (Henry) Reaction. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, vol. 43, iss. 41, pp. 5442–5444. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.200460506>
29. Patnaik P., Khoury J.N. Reaction of Phenol with Nitrite Ion: Pathways of Formation of Nitrophenols in Environmental Waters. *Water Research*, 2004, vol. 38, iss. 1, pp. 206–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.08.022>
30. Prakash G.K.S., Mathew T. *ipso*-Nitration of Arenes. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, vol. 49, iss. 10, pp. 1726–1728. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.200906940>
31. Richardson B.A. *Wood Preservation*. New York, E. & F.N. Spon, 1993. 226 p.
32. Sakaue S., Sakata Y., Nishiyama Y., Ishii Y. Oxidation of Aliphatic and Aromatic Amines with Hydrogen Peroxide Catalyzed by Peroxoheteropoly Oxometalates. *Chemistry Letters*, 1992, vol. 21, no. 2, pp. 289–292. DOI: <https://doi.org/10.1246/cl.1992.289>
33. Tran N., Kalyvas H., Skodje K., Hayashi T., Moenne-Loccoz P., Callan P., Shearer J., Kirschenbaum L., Kim E. Phenol Nitration Induced by an {Fe(NO) $_2$ } $^{10}$  Dinitrosyl Iron Complex. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, vol. 133, no. 5, pp. 1184–1187. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja108313u>
34. Vione D., Belmonto S., Carnino L. A Kinetic Study of Phenol Nitration and Nitrosation with Nitrous Acid in the Dark. *Environmental Chemistry Letters*, 2004, vol. 2, no. 3, pp. 135–139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-004-0088-1>
35. Zarchi M.A.K., Zarei A. Synthesis of Nitroalkanes from Alkylhalides under Mild and Nonaqueous Conditions by Using Polymer Supported Nitrites. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 2005, vol. 52, iss. 2, pp. 309–311. DOI: <https://doi.org/10.1002/jccs.200500047>
36. Zhang W., Zhang J., Ren S., Liu Y. Palladium-Catalyzed Aromatic C-H Bond Nitration Using Removable Directing Groups: Regiospecific Synthesis of Substituted *o*-Nitrophenols from Related Phenols. *The Journal of Organic Chemistry*, 2014, vol. 79, no. 23, pp. 11508–11516. DOI: <https://doi.org/10.1021/jo502145v>