

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

3/375

2020

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)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Камусин А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Кищенко И.Т., д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
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)
Моисеев Н.А., д-р с.-х. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Морозов В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
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)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Селиховкин А.В., д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
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)
Тельшева 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)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

ISSN 0536-1036

DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

NORTHERN (ARCTIC) FEDERAL UNIVERSITY
NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

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 6 times a year

3/375

2020

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)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kamusin A.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Kishchenko I.T., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry Sciences, Prof., Member 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)
Moiseev N.A., Doctor of Agriculture, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Morozov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
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)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Selikhovkin A.V., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sergeevich 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)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Н.Н. Теринов, Е.М. Андреева, С.В. Залесов, Н.А. Луганский, А.Г. Магасумова.</i> Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения.....	9
<i>N.M. Debkov, A. Gradel, A.A. Aleinikov.</i> Reconstruction of Stand History and Impact Evaluation of an Invasive Bark Beetle in Siberian Fir Forests with the Help of Spatial Structure Analysis.....	24
<i>A.S. Alekseev, S.K. Sharma.</i> Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region.....	42
<i>С.Г. Биганова, Ю.И. Сухоруких, К.Н. Кулик, А.К. Кулик.</i> Разнообразие орехов лещины обыкновенной (<i>Corylus avellana</i> L.) и прогноз встречаемости ее форм на Северо-Западном Кавказе.....	55
<i>И.Т. Кищенко.</i> Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесобразующих видов в таежной зоне (Карелия).....	72
<i>A. Karpov, B. Waske.</i> Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries.....	83
<i>Z. Govedar, M. Medarević.</i> Adaptive Forests Management: Case Study of Sessile Oak (<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Leibl.) Forests on Ozren Mountain of the Republic of Srpska.....	93

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>А.Н. Минаев, О.В. Зубова, Д.М. Кулик, В.В. Силецкий, В.И. Луговой.</i> Применение золополимерных смесей в строительстве лесовозных дорог.....	106
<i>К.П. Рукомойников, В.О. Купцова.</i> Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера.....	117

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>О.А. Рублева, А.Г. Гороховский.</i> Экспериментальная оценка прочности склеивания древесины по длине на прямоугольные прессованные шипы.....	128
<i>Г.Ф. Прокофьев, А.М. Тюрин, М.Ю. Кабакова, О.Л. Коваленко.</i> Определение начальной жесткости вальцованных полосовых нерастянутых пил.....	143
<i>В.Н. Ермолин, М.А. Баяндин, С.Н. Казинин, А.В. Намятов, В.А. Острякова.</i> Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ.....	151

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- О.С. Бровко, И.А. Паламарчук, Н.А. Горшкова, А.Д. Ивахнов.* Металлоуглеродные композиты на основе лигносульфонатов..... 159
- Ю.Л. Юрьев.* Получение и использование березового активного угля для доочистки питьевой воды..... 169



CONTENTS

FORESTRY

<i>N.N. Terinov, E.M. Andreeva, S.V. Zalesov, N.A. Lyganskiy, A.G. Magasumova.</i> Restoration of Spruce Forests: Theory, National Practice and Problem Solving...	9
<i>N.M. Debkov, A. Gradel, A.A. Aleinikov.</i> Reconstruction of Stand History and Impact Evaluation of an Invasive Bark Beetle in Siberian Fir Forests with the Help of Spatial Structure Analysis.....	24
<i>A.S. Alekseev, S.K. Sharma.</i> Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region.....	42
<i>S.G. Biganova, Yu.I. Sukhorukikh, K.N. Kulik, A.K. Kulik.</i> Diversity of Common Hazelnuts (<i>Corylus avellana</i> L.) and Occurrence Forecast of Its Forms in the North-Western Caucasus.....	55
<i>I.T. Kishchenko.</i> The Effect of Climatic Factors on the Seasonal Development of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Karelia).....	72
<i>A. Karpov, B. Waske.</i> Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries.....	83
<i>Z. Govedar, M. Medarević.</i> Adaptive Forest Management: Case Study of Sessile Oak (<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Leibl.) Forests on Ozren Mountain of the Republic of Srpska	93

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>A.N. Minaev, O.V. Zubova, D.M. Kulik, V.V. Siletskiy, V.I. Lugovov.</i> Application of Ash-Polymer Mixtures in the Construction of Forest Roads.....	106
<i>K.P. Rukomojnikov, V.O. Kuptcova.</i> Substantiation of Fuel Consumption Rates of a Harvester.....	117

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>O.A. Rubleva, A.G. Gorokhovskiy.</i> Experimental Evaluation of Strength of End Joints with Rectangular Pressed Fingers.....	128
<i>G.F. Prokofiev, A.M. Tyurin, M.Yu. Kabakova, O.L. Kovalenko.</i> Determination of the Initial Stiffness of Unstretched Rolled Strip Saws.....	143
<i>V.N. Ermolin, M.A. Bayandin, S.N. Kazitsin, A.V. Namyatov, V.A. Ostryakova.</i> Water Resistance of Wood-Based Panels Made without Binders.....	151

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- O.S. Brovko, I.A. Palamarchuk, N.A. Gorshkova, A.D. Ivakhnov.* Metal-Carbon Composites Based on Lignosulfonates..... 159
- Yu.L. Yur'ev.* Production and Use of Birch Activated Carbon for Drinking Water Post-Treatment..... 169



УДК 630*182.22:630*231.32

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЕЛОВЫХ ЛЕСОВ: ТЕОРИЯ, ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Н.Н. Теринов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

Е.М. Андреева², канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

С.В. Залесов¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

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

Н.А. Луганский¹, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3341-116X>

А.Г. Магасумова¹, канд. с.-х. наук., доц.; ResearcherID: [H-1607-2019](https://orcid.org/0000-0002-1727-2008),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1727-2008>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: n_n_terinov@mail.ru, zalesov@usfeu.ru, aspir.usfeu@gmail.com

²Ботанический сад Уральского отделения РАН, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; e-mail: e_m_andreeva@mail.ru

За многолетний период подробно проанализирована нормативная и научная литература, касающаяся проблемы восстановления коренных темнохвойных лесов через смену пород. В основе решения проблемы лежит разработанная проф. Б.П. Колесниковым теория лесообразовательного процесса, согласно которой восстановление ельников происходит через стадию формирования коротко- и длительно-производных мягколиственных насаждений. Первые являются наиболее перспективными, так как обладают наиболее высоким демутиационным потенциалом. Высказано предположение, что в процессе произрастания производных мягколиственных древостоев на месте коренных ельников насаждение восстанавливает нарушенные в результате рубок структуру и энергетический баланс. В этот период происходит накопление органического вещества и элементов питания в почве, которые были изъяты из экосистемы с вырубленной древесиной. Подчеркивается, что существенное улучшение водно-физических свойств, химического состава почвы и достижение ею исходного уровня плодородия возможно после 40–60 лет только после произрастания производных мягколиственных древостоев на месте чистых ельников. Сделан вывод, что смена темнохвойных пород на мягколиственные после сплошных рубок – явление массовое, объективное и с точки зрения улучшения лесорастительных условий положительное. С этой позиции ее следует рассматривать не только как стадию в восстановлении, но и как механизм сохранения коренных темнохвойных насаждений. Предлагается использовать период произрастания мягколиственных древостоев в системе лесного хозяйства в качестве восстановительного этапа для формирования продуктивных темнохвойных насаждений. При решении этой задачи конкретно для ельников разработан и запатентован новый метод, получивший название «рубка трансформации». Суть его заключается в том, что на ранних этапах развития производного мягколиственного древостоя проводится уход за молодыми поколениями темнохвойных пород. Весь процесс формирования темнохвойного молодняка или средневозрастного древостоя завершается вырубкой верхнего мягколи-

ственного яруса в возрасте деревьев 45–55 лет, т. е. до достижения ими возраста рубки спелых мягколиственных древостоев. Включение в систему лесного хозяйства этого метода потребует некоторых изменений и дополнений при инвентаризации лесного фонда, составлении проектной документации, а также технического и технологического сопровождения предписанных мероприятий. Например, таксацию производных мягколиственных насаждений необходимо начинать со стадии средневозрастного древостоя и определять полную таксационную характеристику древостоя по поколениям с указанием состава, возраста, высоты и количества древесных пород. Использование в системе хозяйства разработанного метода рубок трансформации для темнохвойных насаждений позволит на первоначальном этапе сдерживать процесс смены пород, а в дальнейшем сбалансировать лиственное и хвойное хозяйство исходя из экологического значения лесных насаждений, лесорастительных условий и перспектив развития конкретной территории.

Для цитирования: Теринов Н.Н., Андреева Е.М., Залесов С.В., Луганский Н.А., Магасумова А.Г. Восстановление еловых лесов: теория, отечественный опыт и методы решения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23

Ключевые слова: смена пород, мягколиственные насаждения, рубка трансформации, формирование еловых насаждений.

Введение

Замена хвойных лесов на производные мягколиственные насаждения характерна для многих регионов России, что прежде всего связано с почти абсолютным доминированием сплошнолесосечной формы хозяйства. Процесс смены пород можно проиллюстрировать на примере Свердловской области, где доля мягколиственных лесов от почти нулевой отметки в начале XX в. [3] увеличилась до 24,0 % к началу 30-х гг. [27]. В 1994 г. производные мягколиственные насаждения занимали уже 37,0 % [13]. По последним официальным данным, площадь производных березняков и осинников в лесном фонде области достигла 42,9 % [21]. В подавляющем большинстве это производные мягколиственные насаждения, сформировавшиеся на месте вырубок еловых древостоев. Замена хвойных насаждений на лиственные происходит ежегодно на площади примерно 270 км². При отсутствии антропогенных воздействий на экосистемы и сохранении современных климатических условий восстановление хвойных формаций на территории Свердловской области займет около 130 лет [5]. Таким образом, смена коренных хвойных насаждений на производные мягколиственные осуществляется под воздействием человеческого фактора, что приводит к снижению комплексной продуктивности лесов [22] и является нежелательным процессом. Это позволяет сделать не противоречащий мнению других исследователей [33] вывод, что с точки зрения воспроизводства ценных хвойных насаждений современная система управления лесами не эффективна.

В странах Западной Европы задача замены одной древесной породы на другую не стоит. Современный тренд лесной политики этих стран – отказ от монокультуры и формирование смешанных насаждений [44], что определяет направление исследований, заключающееся в сравнении смешанных и чистых насаждений по их устойчивости и биоразнообразию [42, 45], структуре и производительности [49, 50], качеству древесины [53].

Цель настоящего исследования – обоснование разработанного метода хозяйства в ельниках с перспективой его включения в систему управления лесными ресурсами России.

Анализ литературных источников по теме исследования

В основе реализации поставленной цели лежит теория лесообразовательного процесса проф. Б.П. Колесникова [18], впоследствии дополненная другими учеными. В соответствии с ней после гибели древостоя в результате какого-либо экзогенного фактора (например, пожара, сплошной рубки, ветровала) естественное восстановление коренных (условно-коренных) насаждений через смену пород возможно через коротко- или длительно-производные насаждения.

В первом случае формирование древостоя с преобладанием коренной древесной породы обеспечивается за период жизни одного ее поколения. Насаждение характеризуется существенным участием этой породы в составе верхнего яруса древостоя или подроста. Такое направление лесообразовательного процесса считается наиболее предпочтительным, так как максимально используются потенциальные возможности насаждения. На него ориентированы научные исследования, нормативные документы и проектная документация.

Во втором случае формирование условно-коренных насаждений происходит по длительно-производному типу лесообразования. Как правило, длительно-производное насаждение характеризуется двумя поколениями главной породы. Одно в небольшом количестве (1–3 ед.) представлено в составе верхнего яруса древостоя, другое доминирует в составе подроста. По этой причине рассчитывать на восстановление насаждения коренной древесной породой за время жизни как минимум одного поколения временно преобладающих мягколиственных деревьев не приходится.

На основании анализа материалов лесоустройства и других исследований по изучению лесообразовательного процесса можно утверждать, что в таежной зоне формирование темнохвойных насаждений естественным способом, как правило, происходит через смену пород [14]. Объективно это подтверждается наличием на значительных лесных территориях производных мягколиственных насаждений, сформировавшихся в 30–40-х гг. XX в. после проведения сплошных концентрированных рубок [37].

Изучение темнохвойных насаждений позволяет предположить механизм формирования ельников через смену древесных пород. В период произрастания мягколиственных древостоев постепенно восстанавливаются структура и энергетический баланс, или «относительное динамическое равновесие биохимических циклов минеральных элементов» [25]. По данным В.Г. Семеновой [34], после вырубки и трелевки деревьев с кронами из ельника удаляется 60 % азота и зольных элементов от их общего количества в насаждении. При трелевке в хлыстах этот показатель снижается на 25 %. По другим данным с лесосеки сплошной рубки при хлыстовой трелевке с древесиной вывозится 40...44 % углерода, 24...28 % азота и 22...23 % зольных элементов, накопленных в фитомассе древостоя [2]. При рубках ухода низовым способом интенсивностью 20 % с заготовленной древесиной отчуждается в 3–5 раз больше элементов питания, чем их поступает с опадом [16].

Возможность компенсировать потерю минеральных веществ и улучшить плодородие лесных почв реализуется в период произрастания производных мягколиственных насаждений на месте вырубок хвойных древостоев [36]. Мягколиственные древостои, подлесок и находящаяся под ними травяная растительность ежегодно дают большее количество разложившегося биологически активного опада, который богат азотом и зольными элементами, по сравнению с хвойными насаждениями [4, 12, 35, 43]. В лиственных лесах формируется индивидуальный химический состав водотока, где концентрации карбонат- и сульфат-ионов, кальция, магния, натрия и железа выше, чем в водотоке ельника [11]. Существенно ускоряется время разложения лесной подстилки [23] с элементами питания, накопленными в период произрастания хвойных древостоев [1]. Это обстоятельство наряду с развитием почвенной биоты [10, 46–48, 51], в частности дождевых червей [52], способствует активному ее разложению, выделению и накоплению углекислоты в приземном слое воздуха, в зоне расположения подроста древесных пород. Все это особенно важно в начальный период формирования древостоев, когда потребление минеральных элементов преобладает над их возвратом [19]. Достижение почвой исходного уровня плодородия, а также существенное улучшение ее водно-физических свойств и химического состава происходит через 40–60 лет после произрастания березняков и осинников на месте чистых ельников [8, 41]. Кроме того, в этот период, который соответствует обороту рубки мягколиственных древостоев, увеличивается численность подроста ели. Позднее его отпад начинает преобладать над его накоплением [15].

Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод, что формирование производных мягколиственных насаждений на месте гибели (вырубки) коренных ельников – явление объективное, распространенное и положительное с точки зрения улучшения лесорастительных условий. Его нужно рассматривать как один из этапов восстановления ельников, а возможно и как механизм сохранения коренных темнохвойных насаждений. Из этого следует практический вывод о необходимости включения процесса смены пород в систему управления лесами.

Анализ нормативных документов и рекомендаций по теме исследования

Восстановление темнохвойных лесов будет наиболее эффективно в насаждениях, где после удаления верхнего мягколиственного яруса древостоя с высокой долей вероятности можно ожидать восстановление коренных древесных пород естественным методом. В этом отношении наиболее перспективными являются первично-производные насаждения, следующие по коротко-производному типу лесообразования, формирующиеся на месте гибели или вырубки коренных древостоев и обладающие высоким восстановительным (демутационным) потенциалом. Вероятность формирования чистых или с преобладанием коренных древесных пород древостоев в первично-производных насаждениях достаточно высокая, и период протекания этого процесса сведен до минимума. Термины первично- и вторично-производного насаждений характеризуют степень удаленности производных мягколиственных насаждений по отношению к коренному (хвойному) типу леса [24]. С увеличением степени производности вероятность восстановления лесов из коренных хвойных пород снижается. Процесс может затормозиться, пользуясь терминологией Б.П. Колесникова, при формировании

«устойчиво-производного насаждения». В этом случае восстановление коренной древесной породы возможно только искусственным методом.

Теперь, когда имеется некая теоретическая основа для решения проблемы смены пород в ельниках и установлены перспективные объекты, необходимо определиться с методом практической реализации восстановления темнохвойных лесов. Для этого исследуем имеющуюся нормативную базу. Согласно Наставлениям по рубкам ухода в лесах Урала [26], главная задача этого мероприятия – получение максимального количества древесины к возрасту рубки спелых древостоев. Даже такие специфические рубки, как рубки переформирования, назначаются в средневозрастных и приспевающих смешанных древостоях в целях повышения их производительности за счет доминирования в составе верхнего яруса главной породы, т. е. наличие только «ясно выраженного второго яруса и достаточное количество жизнеспособного подроста из темнохвойных пород» не могут быть основанием для проектирования рубки переформирования. В противном случае это противоречило бы пункту 2.7 упомянутых выше Наставлений [26], где отмечается, что «пользование древесиной при рубках ухода должно производиться не в ущерб главному пользованию...». При проведении прореживания и проходной рубки в смешанных березняках и осинниках уход осуществляется за хвойными и лиственными деревьями из категории «лучшие», но именно деревья этой категории, в первую очередь материнские ель и пихта, оказывают отрицательное влияние на рост подроста темнохвойных пород [7, 17]. Позднее при рубках эти хорошо развитые особи существенно повреждают нижние ярусы древесной растительности, в том числе подрост. В результате такие рубки ухода в производных мягколиственных насаждениях не в полной мере отвечают задаче восстановления темнохвойных лесов.

В более поздней редакции Правил ухода за лесами (2007 г.) в производных мягколиственных древостоях с участием хвойных пород проектируются рубки переформирования [28], которые начинаются в средневозрастном приспевающем древостое и касаются изменения состава только верхнего его яруса. В мягколиственных древостоях с хвойным подростом проводятся проходные рубки, обеспечивающие только его сохранение. В этом случае переход насаждения из лиственного в хвойное хозяйство откладывается на более позднее время, после рубки спелой березы и осины. При таком подходе существует большая вероятность гибели основной части перспективных молодых поколений и деревьев темнохвойных пород, а естественное восстановление коренных хвойных древостоев может быть отложено на неопределенный срок.

Ныне действующими Правилами ухода за лесами уже предусматривается восстановление хвойных древостоев из молодых поколений деревьев рубками переформирования средневозрастных и приспевающих насаждений [29]. При этом используются способы рубок, регламентированные для спелых древостоев: равномерно-постепенная и чересполосная постепенная. С этим нельзя согласиться. Во-первых, происходит не изменение возрастной, вертикальной структуры древостоя или его породного состава, а формирование совершенно другого насаждения, что не входит в задачи рубок ухода за лесом. Во-вторых, на законных основаниях допускается вырубка древостоев, не достигших возраста спелости. В-третьих, практическая реализация такого мероприятия крайне сложна, потому что возникает много вопросов при оформлении разрешения на его проведение.

Из источников, носящих рекомендательный характер, следует отметить Руководство по организации и технологии рубок главного и промежуточного пользования в мягколиственных насаждениях со вторым ярусом и подростом хвойных пород (1997 г.) [32], рекомендованное для равнинных лесов европейской части России. В нем даны предложения проектным организациям об образовании временных хозяйственных секций, куда бы входили мягколиственные насаждения со вторым ярусом и подростом хвойных пород. Хозяйствующим субъектам в качестве способов восстановления коренных темнохвойных насаждений рекомендованы чересполосные постепенные рубки и проходные рубки высокой интенсивности – 40...50 %. Последние нацелены на выращивание крупномерных деревьев березы и осины «с последующим преобразованием насаждений в хвойные». Также предложены рубка переформирования и равномерно-постепенная рубка высокой интенсивности. При этом в первый прием предполагается вырубать наиболее развитые древесные породы. Оставшиеся до второго приема рубки деревья используются в качестве защитного полога для подростка темнохвойных пород. При всех несомненных достоинствах Руководства нельзя не отметить смешение приоритетов, заключающееся в желании одновременно с максимальным эффектом решить две задачи: первая – выращивание к возрасту рубки спелых производительных древостоев, но высокоинтенсивная рубка переформирования и проходная рубка (рубка простора) не способствуют ее решению; вторая – создание благоприятных лесорастительных условий для темнохвойного подростка, которая также не может быть реализована в полном объеме. При выборочных рубках высокой и очень высокой степени изреживания верхнего яруса древостоя создаются жесткие конкурентные отношения между быстрорастущей порослью мягколиственных пород и темнохвойным подростом. Это является серьезным препятствием для восстановления темнохвойных лесов даже через смену пород [6] и создает высокую вероятность формирования вторично-производных мягколиственных насаждений. Кроме того, при проведении рубки переформирования высокой интенсивности, ориентированной на доминирование деревьев ели в составе древостоя, повышается вероятность ветровала. Рекомендованные Руководством мероприятия по восстановлению темнохвойных лесов являются дополнительными по отношению к перечисленным в основных нормативных документах. Это означает, что им предшествуют все те же основные виды рубок ухода (осветление, прочистка, прореживание, проходная рубка) с их строго определенными задачами и методологией отбора деревьев в рубку.

В еще более ранней работе «Организация хозяйств в мягколиственных и смешанных елово-лиственных насаждениях в зоне интенсивного лесного хозяйства» (1967 г.) [20] рекомендовалось относить лиственные древостои к высокотоварному лиственно-хвойному и мягколиственному хозяйству. Основанием для этого разделения являлся ряд характеристик насаждений (товарная структура древостоя, наличие второго яруса и подростка темнохвойных пород, экономические условия и др.). Предполагалось, что вся необходимая информация будет отражена в материалах лесоустройства. Особое внимание уделялось данным о нижних ярусах древесной растительности на всех возрастных стадиях древостоя. Выдвигались предложения по практической реализации этой задачи, но, по словам самого автора, достичь этого ключевого момента не удалось. Для восстановления ельников в производных мягколиственных и

смешанных елово-лиственных насаждениях рекомендовалась равномерно-постепенная рубка интенсивностью в первый прием 50...60 % от исходного запаса верхнего яруса древостоя. При этом вырубались крупномерные деревья березы и осины, затеняющие молодое поколение темнохвойных пород. При необходимости данное мероприятие дополнялось низовым методом ухода. Но все это проводилось в формате устоявшейся концепции рубок ухода за лесом и рубок главного пользования.

Были попытки выйти за рамки этих правил. Еще в 60-х гг. XX в. Н.Е. Декатов предлагал в 30–40-летних 2-ярусных лиственно-еловых древостоях удалять верхний ярус мягколиственных деревьев за 2 приема рубки [9]. Позднее он подтвердил справедливость этого вывода на основании обследования опытных рубок, выполненных Д.М. Кравчинским в Сиверском опытном лесхозе. Другие исследователи (В.Г. Рубцов и Г.И. Майоров) рекомендовали проведение первого приема постепенной рубки при возрасте мягколиственных древостоев 35 лет. Основанием для такого заключения являлось изучение динамики текущего прироста по высоте деревьев ели, произрастающих во втором ярусе производного мягколиственного насаждения [30]. Уже в современный период при обследовании М.В. Рубцовым и А.А. Дерюгиным сплошных вырубок 45-летних средневозрастных березняков отмечено формирование через 20 лет на их месте чистых или с преобладанием темнохвойных пород древостоев. Этому способствовала вырубка оставшихся после сплошной рубки тонкомерных деревьев березы и осины [31]. Полученные результаты и предложения только сейчас учтены и реализованы в виде рубок реформирования в упомянутых выше действующих Правилах ухода за лесами (2017 г.) [29].

Результаты исследования и их обсуждение

Необходимо четко разделить хозяйственные мероприятия и круг выполняемых ими задач. Рубки спелых и перестойных древостоев специализируются на промышленной заготовке древесины. В задачи рубок ухода за лесом входят повышение комплексной продуктивности насаждений и формирование высокопроизводительных спелых древостоев. Масштабная смена пород и формирование производных мягколиственных насаждений на месте сосняков и ельников вызвали необходимость искать другой подход в сложившейся ситуации. Бесспорно, известные способы рубок спелых древостоев и рубок ухода в определенной мере решают проблему смены пород, но они недостаточно эффективны в силу их специализации. Критериями эффективности являются степень вероятности и продолжительность периода перехода насаждений из лиственного хозяйства в хвойное. Чтобы повысить эту вероятность и сократить период восстановления еловых лесов до разумного минимума, необходимо уже в средневозрастных мягколиственных древостоях создавать условия для успешного роста нижних ярусов темнохвойных пород. Поэтому уход в таких насаждениях должен осуществляться не за «лучшими» деревьями верхнего яруса древостоя, а за перспективными поколениями ели, пихты и кедра. Это в корне расходится с основополагающими принципами и задачами рубок ухода. Более того, на сегодняшний день ни одна из известных систем рубок последовательно и целенаправленно не занимается заменой березняков и осинников на древостой из подростка темнохвойных пород, который специально формируется под пологом

мягколиственных насаждений. Однако расчеты и полученные практические результаты показывают, что такой подход при соответствующем правовом, техническом и технологическом обеспечении позволит с высокой вероятностью сформировать темнохвойный молодняк или средневозрастной темнохвойный древостой как минимум на 10 лет раньше, чем если бы это происходило по принятой на сегодняшний день схеме [39].

Поэтому необходимо разработать систему мероприятий, включая рубки, направленные исключительно на трансформацию (от лат. *transformation* – преобразование, превращение) производных мягколиственных насаждений в темнохвойные. Таким образом, систему мероприятий, главной целью которых является уход за темнохвойным подростом в период произрастания производного мягколиственного древостоя и проводимых до возраста рубки спелого мягколиственного древостоя, предлагается именовать рубками трансформации. Результат этих рубок – формирование темнохвойных насаждений из древесных пород, произрастающих в нижнем ярусе древостоя. Следовательно, мероприятия по восстановлению темнохвойного насаждения коренной древесной породой начинаются на ранних стадиях онтогенеза производного мягколиственного древостоя и завершаются вырубкой деревьев верхнего мягколиственного яруса в возрасте 45–55 лет.

Включение в систему хозяйства рубок трансформации предусматривает их техническое и технологическое сопровождение. Кроме того, потребуется внесение некоторых изменений и дополнений при проведении таксационных работ и составлении проектной документации. Например, таксацию производных мягколиственных насаждений следует начинать со стадии средневозрастного древостоя с описанием нижних ярусов древесной растительности (состав, возраст, высота и количество здоровых особей). Количество рубок в цикле рубок трансформации может составлять от 1 до 3. Срок проведения первой рубки трансформации определен на основании экспериментальных исследований, осуществляется в возрасте подростка темнохвойных пород 15, 20, 25 и 30 лет и зависит от возраста мягколиственных пород в момент появления всходов ели и пихты. Так, при одновременном заселении вырубki мягколиственными и темнохвойными породами первая рубка трансформации для темнохвойного подростка проводится в возрасте 30 лет, а если всходы появились под пологом 5-летнего лиственного молодняка, то в возрасте 25 лет. И в том, и другом случае возраст деревьев верхнего мягколиственного яруса составит 30 лет. При появлении темнохвойных пород под пологом 10–20-летнего мягколиственного молодняка первая рубка трансформации проводится при возрасте подростка ели и пихты 20 лет. Соответственно, возраст березы и осины составит 30–40 лет. При появлении всходов ели и пихты в 25–35-летнем мягколиственном древостое рубка трансформации проводится при достижении темнохвойным подростом возраста 15 лет, при этом возраст верхнего мягколиственного яруса – 40–50 лет. В последнем случае трансформация мягколиственного насаждения в темнохвойное осуществляется с помощью одноразовой рубки с использованием двухприемного равномерно-постепенного или чересполосного постепенного способа. Во всех других вариантах с периодом 8 лет проводятся 2 или 3 рубки. Продолжительность периода между рубками также устанавливается экспериментально. В первую очередь в рубку назначаются наиболее

развитые деревья, которые согласно хозяйственно-биологической классификации относятся к категории «лучшие». Интенсивность рубки зависит от относительной полноты древостоя. При высокой относительной полноте (0,8–1,0) она снижается до 0,6, при средней (0,7) – до 0,5. Снижение полноты до требуемых значений обеспечивается 30...35 %-й выборкой деревьев по запасу в пасаках между технологическими коридорами (пасечными волоками). При этом общая степень изреживания верхнего яруса древостоя – 45...50 %. Наиболее оптимальным вариантом является ситуация, когда при последней рубке трансформации возраст деревьев ели и пихты, планируемых для замены мягколиственных древостоев, находится в интервале 40...50 лет. Более полно тема рубок трансформации с практическим подтверждением изложенных выше рекомендаций раскрыта в другой работе [38] одного из соавторов данной статьи.

Институтом интеллектуальной и промышленной собственности в 2014 г. на метод формирования темнохвойных насаждений был оформлен патент [40].

Выводы

1. В лесах таежной зоны России, в том числе на Урале, идет массовая смена коренных темнохвойных насаждений на производные мягколиственные.

2. Согласно теории лесообразовательного процесса Б.П. Колесникова восстановление ельников происходит через стадию формирования коротко- и длительно-производных мягколиственных насаждений.

3. Из всей совокупности производных мягколиственных насаждений наиболее перспективными являются первично-производные, формирующиеся по коротко-производному типу лесообразования.

4. Метод рубок трансформации, разработанный на основе прошлого опыта и исследований в области лесоведения, подтвержден на практике, построен на принципах сопровождения и разумного ускорения естественного процесса лесообразования и наравне с рубками спелых древостоев и рубками ухода служит самостоятельным мероприятием.

5. Включение в систему хозяйства разработанного метода рубок трансформации для ельников позволит на первоначальном этапе сдерживать увеличение площадей производных насаждений, а в перспективе – сбалансировать листовое и хвойное хозяйство исходя из экологического значения лесов, лесорастительных условий и перспектив развития конкретной территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анциферова О.А. Влияние еловых насаждений на свойства буроземов Калининградской области // Вестн. Балт. федер. ун-та им. И. Канта. Сер.: Естеств. и мед. науки. 2010. № 7. С. 111–116. [Antsiferova O.A. The Impact of Spruce Plantations on Burozem in the Kaliningrad Region. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Estestvennyye i meditsinskiye nauki* [IKBFU's Vestnik. Ser. Natural and Medical Sciences], 2010, iss. 7, pp. 111–116].

2. Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесосечных рубках в ельниках Средней тайги // Лесоведение. 2012. № 6. С. 44–54. [Bobkova K.S., Likhanova N.V. Losses of Carbon and Mineral Nutrients in Clear Cuttings of Spruce Forests in the Middle Taiga. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2012, no. 6, pp. 44–54].

3. Боков В.Е. Артинская казенная горнозаводская дача // Лесн. журн. 1901. № 4. С. 21–32. [Bokov V.E. The Arti Metallurgical State Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1901, no. 4, pp. 21–32].

4. Винокурова Р.И., Лобанова О.В. Специфичность распределения макроэлементов в органах древесных растений елово-пихтовых лесов республики Марий Эл // Вестн. Поволж. гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 76–83. [Vinokurova R.I., Lobanova O.V. Specificity of Distribution of Macrocells in Parts of Wood Plants of Spruce-Fir Forests in the Republic of Mari El. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Forest. Ecology. Nature management»], 2011, no. 2, pp. 76–83].

5. Водные и лесные ресурсы Свердловской области. Режим доступа: <http://py-страна.рф/article.php?nid=12193> (дата обращения 18.04.2019). [*Water and Forest Resources of Sverdlovsk Region*].

6. Данилик В.Н. Совершенствование рубок главного пользования на Урале // Материалы науч. конф. по вопросам лесн. хоз-ва /под ред. К.Б. Лосицкого, А.В. Побединского, Н.М. Набатова. Пушкино: ВНИИЛМ, 1970. С. 102–105. [Danilik V.N. Improvement of Harvest Cuttings in the Urals. *Proceedings of the Scientific Conference on Forestry*. Ed. by K.B. Lositskiy, A.V. Pobedinskiy, N.M. Nabatov. Pushkino, VNIILM Publ., 1970, pp. 102–105].

7. Данченко А.М., Бех И.А. Перспективы освобождения кедрового подроста из-под полога других пород // Вестн. Томск. гос. ун-та. Сер.: Биология. 2010. № 1(9). С. 68–77. [Danchenko A.M., Beh J.A. Outlooks of Siberian Stone Pine Undergrowth Liberation Cuttings from Various Tree Canopy. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2010, no. 1(9), pp. 68–77].

8. Дедков В.С., Павлова Т.С., Прокопович Е.В., Агафонов Л.И. Рубки леса и свойства горно-лесных бурно-подзолистых почв Среднего Урала // Антропогенные воздействия на свойства почв. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. С. 21–35. [Dedkov V.S., Pavlova T.S., Prokopovich E.V., Agafonov L.I. Forest Cuttings and Properties of Mountain Brown Podzolic Forest Soils of the Middle Urals. *Anthropogenic Impacts on Soil Properties*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1987, pp. 21–35].

9. Декатов Н.Е. Повысить эффективность содействия лесовозобновлению // Лесн. хоз-во. 1962. № 8. С. 19–23. [Dekатов N.E. Improve the Effectiveness of Promotion for Reforestation. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 8, pp. 19–23].

10. Долгин М.М., Колесникова А.А., Конакова Т.Н. Почвенная мезофауна средне-таежных лесов Республики Коми // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2012. № 3. С. 73–85. [Dolgin M.M., Kolesnikova A.A., Konakova T.N. Soil Meso-fauna of the Komi Republic Middle Taiga Forests. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Arctic Environmental Research], 2012, no. 3, pp. 73–85].

11. Дымов А.А. Химический состав водотоков в коренном еловом и производном лиственно-хвойном лесах // Вода: химия и экология. 2013. № 4(58). С. 97–101. [Dymov A.A. Chemical Composition of Water Streams in Native Spruce and Secondary Deciduous-Coniferous Forests. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology], 2013, no. 4(58), pp. 97–101].

12. Дымов А.А., Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Ракина Д.А. Растительный опад в коренном ельнике и лиственно-хвойных насаждениях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 3. С. 7–18. [Dymov A.A., Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V., Rakina D.A. Tree Waste in an Aboriginal Spruce Forest and Mixed Stands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 3, pp. 7–18]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e87/gkujl1.pdf>

13. Залесов С.В., Луганский Н.А. Основные тенденции в динамике лесного фонда Свердловской области и пути оптимизации лесопользования // Леса Урала и хозяйство

в них. 1994. № 17. С. 4–23. [Zalesov S.V., Luganskiy N.A. The Main Trends in the Dynamics of the Forest Fund of Sverdlovsk Region and Ways to Optimize Forest Management. *Lesnaya Urala i khozyaystvo v nikh*, 1994, no. 17, pp. 4–23].

14. Запруднов В.И., Пинягина Н.Б., Горшенина Н.С. Современное состояние лесного сектора Российской Федерации, задачи и перспективы развития лесозаготовительной промышленности // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2014. Т. 18, № 3. С. 81–101. [Zaprudnov V.I., Piniagina N.B., Gorshenina N.S. Current State of the Russian Federation Forest Sector, Tasks and Prospects of Forest Industry Development. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2014, vol. 18, no. 3, pp. 81–101].

15. Изучить процессы возобновления, смены древесных пород и формирования древостоев, разработать системы и способы рубок в лесах различных групп. Разработать лесоводственные требования и применительно к ним новую технику, а также новую технологию для сплошных и несплошных рубок главного пользования, обеспечивающих выращивание высокопродуктивных насаждений: отчет о НИР (заключ.). Шифр темы 053026. Пушкино: ВНИИЛМ, 1975. 102 с. [To Study the Processes of Renewal, Succession of Tree Species and Formation of Forest Stands, to Develop Systems and Methods of Cuttings in Forests of Various Groups. To Work out Forest Requirements and the New Technique for Them, as Well as the New Technology for Clear and Selective Final Cuttings, which Provide Growing of High-Productivity Forest Stands: Research Report. Pushkino, VNIILM Publ., 1975. 102 p.].

16. Казимиров Н.И., Морозов Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 175 с. [Kazimirov N.I., Morozov R.M. *Biological Cycle of Substances in Spruce Forests of Karelia*. Leningrad, Nauka Publ., 1973. 175 p.].

17. Калачев А.А., Залесов С.В. Качество подроста пихты сибирской под пологом пихтовых и березовых насаждений Рудного Алтая // Аграр. вестн. Урала. 2014. № 4(122). С. 64–67. [Kalachev A.A., Zalesov S.V. Undergrowth Quality of Fir Siberian under Firry and Birch Stands Canopy in Rudny Altai. *Agrarnyj vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2014, no. 4(122), pp. 64–67].

18. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 275 с. [Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., E.P. Smolonogov. *Forest Site Conditions and Forest Types in Sverdlovsk Region*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1973. 275 p.].

19. Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В., Шанин В.Н., Видягина Е.О., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Воздействие осинового плантация с коротким оборотом рубки на биологический круговорот углерода и азота в лесах бореальной зоны: модельный эксперимент // Мат. биология и биоинформатика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 398–415. [Komarov A.S., Chertov O.G., Bykhovets S.S., Pripulina I.V., Shanin V.N., Vidjagina E.O., Lebedev V.G., Shestibratov K.A. Effects of the Aspen Short-Rotation Plantation on the C and N Biological Cycles in Boreal Forests: The Model Experiment. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika* [Mathematical Biology and Bioinformatics], 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 398–415]. DOI: [10.17537/2015.10.398](https://doi.org/10.17537/2015.10.398)

20. Костылев А.С. Организация хозяйств в мягколиственных и смешанных елово-лиственных насаждениях в зоне интенсивного лесного хозяйства. М.: ЦНИИТЭИ-леспром, 1967. 20 с. [Kostylev A.S. *Organization of Facilities in Deciduous and Mixed Spruce-Deciduous Forest Stands in the Zone of Intensive Forestry*. Moscow, TsNIITEIlesprom Publ., 1967. 20 p.].

21. Лесной план Свердловской области на 2009–2018 гг.: указ губернатора Свердлов. обл. № 279-УГ от 03.06.2013 г. Екатеринбург, 2013. 368 с. [Forest Plan of Sverdlovsk Region for the 2009–2018 Period: Decree of the Governor of Sverdlovsk Region No. 279-UG on June 3, 2013. Yekaterinburg, 2013. 368 p.].

22. Луганский Н.А., Залесов С.В., Луганский В.Н. Лесоведение. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2010. 432 с. [Luganskiy N.A., Zalesov S.V., Luganskiy V.N. *Forest Science*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 432 p.]

23. Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва–растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 45–56. [Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G. Forest Soil Fertility: The Base of Relationships between Soil and Vegetation. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2010, no. 5, pp. 45–56].

24. Лысов Л.А. Моделирование роста и динамики производительности производных березовых древостоев на Среднем Урале // Экологические основы рационального использования и воспроизводства лесов Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 93–94. [Lysov L.A. Modeling of Growth and Productivity Dynamics of Secondary Birch Forest Stands in the Middle Urals. *Ecological Background of Sustainable Use and Regeneration of Forests in the Urals*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1986, pp. 93–94].

25. Манаков К.Н., Никонов В.В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. 196 с. [Manakov K.N., Nikonov V.V. *Biological Cycle of Mineral Elements and Soil Formation in Spruce Forests of the Far North*. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 196 p.]

26. Наставления по рубкам ухода в лесах Урала / Федер. служба лесн. хоз-ва России. М.: Всерос. науч.-исслед. информ. центр по лесным ресурсам, 1994. 100 с. [*Instructions for Thinning in the Ural Forests*. Federal Forestry Service of Russia. Moscow, All-Russian Research and Information Center for Forest Resources Publ., 1994. 100 p.]

27. Переход В.И. Краткая характеристика лесозакономических условий Уральской области // Зап. лесопром. ф-та УПИ. Свердловск: УПИ, 1929. Вып. 1. С. 15–27. [Perekhod V.I. A Brief Description of Forest Economic Conditions of Ural Region. *Zapiski lesopromyshlennogo fakul'teta UPI*. Sverdlovsk, UPI Publ., 1929, iss. 1, pp. 15–27].

28. Правила ухода за лесами: приказ М-ва прир. ресурсов РФ № 185 от 16.07.2007 г. М.: МПР РФ, 2007. 43 с. [*Rules for the Forest Care: Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 185 on July 16, 2007*. Moscow, MNR RF Publ., 2007. 43 p.]

29. Правила ухода за лесами: приказ М-ва прир. ресурсов и экологии РФ № 626 от 22.11.2017 г. М.: МПРиЭ РФ, 2017. 163 с. [*Rules for the Forest Care. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 626 on November 22, 2017*. Moscow, MNRiE RF Publ., 2017. 163 p.]

30. Рубцов В.Г., Майоров Г.И. Оптимальные возрасты постепенных рубок в лиственных и смешанных насаждениях лесов II и I групп Северо-Запада европейской части СССР // Сб. науч.-исслед. работ по лесн. хоз-ву. М.: Лесн. пром-сть, 1966. Вып. 10. С. 50–58. [Rubtsov V.G., Mayorov G.I. Optimal Ages of Gradual Cuttings in Deciduous and Mixed Forest Stands of II and I Groups of the North-West of the European Part of the USSR. *Collection of Scientific and Research Papers on Forestry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1966, iss. 10, pp. 50–58].

31. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Отпад деревьев после рубки древостоев березы с сохранением ели в южной тайге центральной части Русской равнины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 5. С. 9–25. [Rubtsov M.V., Deryugin A.A. Mortality of Trees after a Birch Cutting with Preservation of Spruce in Southern Taiga in the Centre of the Russian Plain. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2015, no. 5, pp. 9–25]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2015.5.9](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.5.9), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/7af/rubtsov.pdf>

32. Руководство по организации и технологии рубок главного и промежуточного пользования в мягколиственных насаждениях со вторым ярусом и подростом хвойных пород (для равнинных лесов европейской части России) / Федер. служба лесн. хоз-ва России. М.: ВНИИЦлесресурс, 1997. 55 с. [*Manual for Organization and Technology of Final and Intermediate Cuttings in Deciduous Forests with Understorey and Undergrowth*

of Coniferous Species (For Plain Forests of the European Part of Russia). Federal Forestry Service of Russia. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 1997. 55 p.].

33. Седых В.Н. Лесообразовательный процесс. Новосибирск: Наука, 2009. 163 с. [Sedykh V.N. *The Forest Formation Process*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 163 p.].

34. Семенова В.Г. Влияние рубок главного пользования на почвы и круговорот веществ в лесу. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 183 с. [Semenova V.G. *The Influence of Final Cuttings on Soils and Cycle of Substances in the Forest*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 183 p.].

35. Солодовников А.Н. Показатели плодородия почв под лиственными и хвойными лесами в среднетаежной подзоне Северо-Запада России // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=23221> (дата обращения: 18.04.2019). [Solodovnikov A.N. Indicators of Deciduous and Coniferous Forest's Soil Fertility of North-West Russia Middle-Taiga Zone. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 6].

36. Тарасов П.А. Оценка влияния смены сосны березой на свойства почв в условиях Приангарья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 2. С. 14–19. [Tarasov P.A. Evaluation of Pine-Birch Succession Effect on the Soil Properties in the Angara River Area. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 2, pp. 14–19]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/9f3/glo2.pdf>

37. Теринов Н.И. Возобновление ели на концентрированных вырубках 1929–1931 гг. в хвойно-широколиственных лесах Среднего Урала // Леса Урала и хозяйство в них. 1970. № 5. С. 107–109. [Terinov N.I. Reforestation of the Spruce Species on the Concentrated Cuttings in 1929–1931 in the Coniferous-Deciduous Forest Stands of the Middle Urals. *Lesy Urala i khozyaystvo v nikh*, 1970, no. 5, pp. 107–109].

38. Теринов Н.Н. Метод формирования темнохвойных насаждений // Тр. СПбНИИ лесн. хоз-ва. 2013. Вып. 1. С. 64–71. [Terinov N.N. The Method of Formation of Dark-Coniferous Forest Stands. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2013, iss. 1, pp. 64–71].

39. Теринов Н.Н. Концепция трансформации производных мягколиственных насаждений в темнохвойные с целью повышения продуктивности лесов Урала: автореф. дис. ... д-ра. с.-х. наук. Екатеринбург, 2014. 44 с. [Terinov N.N. *The Concept of Transformation of the Secondary Deciduous Forest Stands into Dark Coniferous Forest Stands to Order to Increase the Forest Productivity in the Urals*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Yekaterinburg, 2014. 44 p.].

40. Теринов Н.Н. Способ трансформации производных мягколиственных насаждений в темнохвойные: патент № 2521706. М.: ФГУ ФИПС, 2014. [Terinov N.N. *Method of Transformation of Derived Softwood Planting to Dark Coniferous*. Patent RF no. 2521706, 2014].

41. Теринов Н.И., Турков В.Г. Антропогенная динамика горных лесов Среднего Урала // Эколого-географические и генетические принципы изучения лесов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 158–163. [Terinov N.I., Turkov V.G. Anthropogenic Dynamics of Mountain Forests in the Middle Urals. *Ecological, Geographical and Genetic Principles of the Study of Forests*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1983, pp. 158–163].

42. Carnol M., Baeten L., Branquart E., Grégoire J.-C., Heughebaert A., Muys B., Ponette Q., Verheyen K. Ecosystem Services of Mixed Species Forest Stands and Monocultures: Comparing Practitioners' and Scientists' Perceptions with Formal Scientific Knowledge. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2014, vol. 87, iss. 5, pp. 639–653. DOI: [10.1093/forestry/cpu024](https://doi.org/10.1093/forestry/cpu024)

43. Carnol M., Bazgir M. Nutrient Return to the Forest Floor through Litter and Throughfall under 7 Forest Species after Conversion from Norway Spruce. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 309, pp. 66–75. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.04.008](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.008)

44. Chauvat M., Titsch D., Zaytsev A.S., Wolters V. Changes in Soil Faunal Assemblages during Conversion from Pure to Mixed Forest Stands. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 262, iss. 3, pp. 317–324. DOI: [10.1016/j.foreco.2011.03.037](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.037)
45. Felton A., Lindbladh M., Brunet J., Fritz Ö. Replacing Coniferous Monocultures with Mixed-Species Production Stands: An Assessment of the Potential Benefits for Forest Biodiversity in Northern Europe. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 260, iss. 6, pp. 939–947. DOI: [10.1016/j.foreco.2010.06.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.011)
46. Korboulewsky N., Perez G., Chauvat M. How Tree Diversity Affects Soil Fauna Diversity: A Review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, vol. 94, pp. 94–106. DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.11.024](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.024)
47. López-Mondéjar R., Voříšková J., Větrovský T., Baldrian P. The Bacterial Community Inhabiting Temperate Deciduous Forests is Vertically Stratified and Undergoes Seasonal Dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, vol. 87, pp. 43–50. DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.04.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.008)
48. Prescott C.E., Grayston S.J. Tree Species Influence on Microbial Communities in Litter and Soil: Current Knowledge and Research Needs. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 309, pp. 19–27. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.02.034](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.034)
49. Pretzsch H., Biber P. Tree Species Mixing Can Increase Maximum Stand Density. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 1179–1193. DOI: [10.1139/cjfr-2015-0413](https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0413)
50. Pretzsch H., Schütze G. Effect of Tree Species Mixing on the Size Structure, Density, and Yield of Forest Stands. *European Journal of Forest Research*, 2016, vol. 135, pp. 1–22. DOI: [10.1007/s10342-015-0913-z](https://doi.org/10.1007/s10342-015-0913-z)
51. Thoms C., Gleixner G. Seasonal Differences in Tree Species' Influence on Soil Microbial Communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, vol. 66, pp. 239–248. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.05.018](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.018)
52. Verstraeten G. *Conversion of Deciduous Forests to Spruce Plantations and Back: Evaluation of Interacting Effects on Soil, Forest Floor, Earthworm and Understorey Communities*. PhD Thesis in Applied Biological Sciences. Ghent, Belgium, Ghent University, 2013. 152 p.
53. Zeller L., Ammer Ch., Annighöfer P., Biber P., Marshall J., Schütze G., del Río Gaztelurrutia M., Pretzsch H. Tree Ring Wood Density of Scots Pine and European Beech Lower in Mixed-Species Stands Compared with Monocultures. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 400, pp. 363–374. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.06.018](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.018)

RESTORATION OF SPRUCE FORESTS: THEORY, NATIONAL PRACTICE AND PROBLEM SOLVING

N.N. Terinov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [N-2884-2019](https://orcid.org/0000-0001-5936-208X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>

E.M. Andreeva², Candidate of Biology, Senior Research Scientist; ResearcherID: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

S.V. Zalesov¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

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

N.A. Lyganskiy¹, Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3341-116X>

A.G. Magasumova¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-1607-2019](https://orcid.org/0000-0002-1727-2008),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1727-2008>

¹Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: n_n_terinov@mail.ru, zalesov@usfeu.ru, aspir.usfeu@gmail.com

²Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; e-mail: e_m_andreeva@mail.ru

Detailed analysis of standard and scientific literature on the problem of restoration of primary dark coniferous forests through the species succession is made for a long-term period. The forest formation theory developed by Professor B.P. Kolesnikov is behind the problem solution. According to this theory the restoration of spruce forests occurs through the formation stage of short-term and long-term secondary soft-leaved plantations. The short-term plantations are the most promising as they have the highest regeneration potential. It has been suggested that during the growth process of secondary soft-leaved forest stands on the site of primary spruce forests the plantation restores its structure and energy balance that were changed as a result of cuttings. Over this period accumulation of organic matter and nutrients, which had been removed from the ecosystem with cut trees, occurs in the soil. We shall underline that substantial improvement of water-physical properties, chemical composition of soil and its achievement of initial level of fertility is possible only after 40–60 years when secondary soft-leaved stands will grow in the place of pure spruce forests. It was concluded that succession of dark coniferous species to soft-leaved ones after clear cuttings is a massive and objective phenomenon; and from the point of view of improvement of the forest site conditions it is positive. In this case it should be considered not only as a stage of restoration, but, perhaps, as a mechanism of preservation of primary dark coniferous forest plantations. The growing period of soft-leaved plantations is proposed to use in the forestry system as a restoration stage for the formation of productive dark coniferous plantations. A new method named transformation cutting was developed and patented specifically for spruce forests in order to solve this issue. Its essence lies in the fact that care of young generations of dark coniferous species is taken in the early stages of the secondary soft-leaved stand development. The entire process of formation of dark coniferous young growth or middle-aged forest stand finishes with cutting of upper soft-leaved storey at the tree age of 45–55 years, i.e. before they reach the cutting age of mature soft-leaved stands. The inclusion of this method in the system of forestry would require some changes and additions in inventory of forest fund, preparation of project documents, as well as technical and engineering support of the prescribed measures. For instance, it is necessary to start the valuation of secondary soft-leaved forest plantations with the middle-aged stand and determine the full valuation description of the stand by generations indicating the composition, age, height and number of tree species. The use of the developed method for dark coniferous forest plantations in forestry will allow to slow down the process of species succession and later on to balance deciduous and coniferous forests based on the ecological value of forest stands, forest site conditions and prospects for the development of a specific area.

For citation: Terinov N.N., Andreeva E.M., Zalesov S.V., Lyganskiy N.A., Magasumova A.G. Restoration of Spruce Forests: Theory, National Practice and Problem Solving. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-9-23

Keywords: succession of species, soft-leaved plantations, transformation cutting, forming of spruce stands.

Поступила 20.05.19 / Received on May 20, 2019

УДК [630*45](571.16)

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-24-41

**RECONSTRUCTION OF STAND HISTORY AND IMPACT
EVALUATION OF AN INVASIVE BARK BEETLE IN SIBERIAN FIR
FORESTS WITH THE HELP OF SPATIAL STRUCTURE ANALYSIS**

N.M. Debkov^{1,2}, *Candidate of Agriculture, Researcher*; *ResearcherID: [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

A. Gradel^{3,4}, *PhD, Forestry Consultant*; *ResearcherID: [AAK-1808-2020](https://orcid.org/0000-0002-6298-4151)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6298-4151>

*A.A. Aleinikov*⁵, *Candidate of Biology, Senior Research Scientist*; *ResearcherID: [K-1285-2017](https://orcid.org/0000-0002-5715-8488)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5715-8488>

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akademicheskiiy, 10/3, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

²National Research Tomsk State University, prosp. Lenina, 36, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

³International Forestry Consultancy Gradel, Jakobstraße 12, 02826 Görlitz, Germany; e-mail: agradel@jpberlin.de

⁴Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 5, 37077 Göttingen, Germany

⁵Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya, 84/32, str. 14, Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: aaacastor@gmail.com

The most devastating insect invasion of forest ecosystems in Russia is the recent mass reproduction of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) in southern Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) forests. The objective of our research was to study the spatial structure of fir forests and their change under the impact of the four-eyed fir bark beetle in its secondary (invasive) distribution range. We selected two fir stands located near the villages of Itatka and Malinovka in the Tomsk region. Both stands represent natural ripe succession forests on sites that previously experienced logging activities, which were triggered by settlement activities in the second half of the nineteenth century. We used Field-Map technology for gathering non-spatial and spatial stand data. The analysis showed that height, diameter and radial increment of fir trees, killed or severely weakened by attacks of the four-eyed fir bark beetle, were significantly lower than that of healthy individuals. The social status of fir trees, seriously attacked or already killed by *Polygraphus proximus* was indicated by the U_i index as moderately suppressed. In contrast to the distribution pattern of living firs, the pattern of dead or severely weakened firs killed by the four-eyed fir bark beetle was significantly clumped over short distances (sample plots (SP) Itatka and Malinovka). This finding coincides with visual observations in other stands, that dead trees are grouped to some extent. However, the hypothesis of spatial independence of the tree positions of living and dead firs was accepted for both plots.

Funding: The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the government of Tomsk region, grant No. 16-44-700782, and carried out as part of a state assignment of the Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (No. AAAA-A18-118052400130-7).

For citation: Debkov N.M., Gradel A., Aleinikov A.A. Reconstruction of Stand History and Impact Evaluation of an Invasive Bark Beetle in Siberian Fir Forests with the Help of Spatial Structure Analysis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 24–41. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-24-41

Keywords: insect invasions, *Polygraphus proximus* Blandf., *Abies sibirica* Ledeb., tree mortality, spatio-temporal characteristics.

Introduction

The beginning of the twenty-first century is accompanied by massive cases of invasions of alien biota [6]. In addition long-term modeling shows an increase in the number of invasions [5]. This also applies to forest ecosystems. The economic, environmental and social consequences of exposure to invaders [11, 13, 24] allow us to consider them as disturbance forces and factors of forest-forming processes. The most devastating invasions in Russia are invasions of the box tree moth *Cydalima perspectalis* [1], emerald ash borer *Agilus planipennis* [43] and four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* [28]. The latter one is also denoted as the Far Eastern bark beetle invasion due to its original distribution area. In terms of scale and risks for Russian forest management, the invasion of this insect is the most significant in Siberia, where it first occurred in 2008 [28]. According to Kharuk et al. [26] the progressive spread of the aggressive beetle *Polygraphus proximus* in Siberia is associated with the impact of climate change. Its mass reproduction is promoted by the weakening of forests by water stress due to the increasing climate aridisation [25].

Along with traditional research methods, spatial structure analysis is increasingly used for solving complex ecological issues [17, 27, 34, 36], which allows to make predictions of ecosystem dynamics [22]. Spatial forest structure has been considered as an indicator of ecological stability, biodiversity, competition processes and forest ecosystem functioning [12, 30, 33, 39, 44, 46], and determines microclimatic conditions, the provision of resources and characteristic features of forest habitats [17, 30]. The main parameter of spatial forest structure is the tree distribution pattern [17, 42]. Recently, the impact of different harvest events on horizontal tree distribution patterns has been studied in different conifer stands in the region, specifically in north China and Mongolia [18, 31]. However, there are hardly any studies that assessed or monitored the impact of an invasive bark beetle species on the spatial structure of boreal conifer stands. To our knowledge, there are no studies that analysed the impact of invasive bark beetles on the spatial structure in Russian forests. Spatial structure transformation in forests exposed to invasive organisms is of particular interest.

In this regard, our aim was to study the spatial structure of fir forests and their change under the impact of the Far Eastern bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandf.) in the secondary range of distribution in Tomsk region. We specifically researched the preferences of the bark beetle in terms of size and social status of trees and how the infestation changes the forest structure. We hypothesised that the bark beetle attacks and kills smaller, older and less dominant trees and that trees are not randomly attacked, but are grouped within the stand.

Materials and methods

We selected two fir forest stands in Tomsk region in the Kornilovskoye lesnichestvo (forest unit). Both stands have been subjected to recent infestation by *Polygraphus proximus* and are situated in the vicinity of the villages of Itatka and

Malinovka (Fig. 1). In each stand, we established one permanent large-sized sample plot (SP Itatka and SP Malinovka). The SPs differ in the succession stage and utilisation history. The forest stand near the village of Itatka was subjected to selective logging, and near the village of Malinovka, to clear-cutting.



Fig. 1. Study area

Data assessment

On each plot we assessed the following data: tree species, diameter at breast height (DBH), tree height, tree age, crown length, crown projection area and radial growth of every tree with a minimum DBH of 6 cm. We used Field-Map technology, which combines a flexible real-time GIS software Field-Map with electronic equipment for mapping and dendrometric measurements. Additionally, the tree status of each fir tree was evaluated according to a six-point scale, which describes the impact of *Polygraphus proximus* on *Abies sibirica*. The calculation of the average weighted category of tree status was performed by the following formula [28]:

$$AWTS = \frac{\sum g_1 + \sum g_2 + \sum g_3 + \sum g_4 + \sum g_5 + \sum g_6}{\sum G}, \quad (1)$$

where AWTS – the average weighted category of tree status in the respective stand; $\sum g_1$, $\sum g_2$, $\sum g_3$, $\sum g_4$, $\sum g_5$, $\sum g_6$ – the sums of the basal areas of healthy, weakened, severely weakened, dead and dead standing trees (fresh and old), respectively; $\sum G$ – the sum of basal areas of all fir trees in the sample plot (RS).

Dead wood assessment was carried out according to the following classification: 0 – not yet decomposed; 1 – recently deceased: bark poorly separated, wood without rot; 2 – slightly decomposed: bark easily breaks off and disappears, rot is up to 25 % of

the diameter; 3 – moderately decomposed: rot is up to 50 % of the diameter, the core of the trunk is solid; 4 – highly decomposed: rot is 50–75 %, the core of the trunk is solid; 5 – almost completely decomposed: rot is more than 75 %; 6 – completely decomposed (humification of wood). See Table 1 for an overview of both plots.

Data analysis

Measurements were carried out using the Field-Map technology system for the computer-aided field data collection. Core sampling was performed with an incremental borer (length of 400 mm; diameter of 5.15 mm, Haglof, Sweden). In rare cases, we obtained cookies with the help of a Husqvarna 365 chain saw. The width of the tree rings was measured using the LINTAB-5 complex with the TSAP software package [37] with an accuracy of 0.01 mm.

Table 1

Characteristics of the fir stands on the sample plots, 2018

Stand composition, %	Health status	Height, m	Diameter, cm	Crown projection area, m ²	Crown length, m	Radial growth, mm/yr	Age, yrs
<i>Malinovka, 30×80 m; altitude (a.s.l.) – 179 m; AWTS – 3.0 units; density – 1000 trees/ha</i>							
56F	living	18.4±1.5	24.1±2.2	7.4±0.7	10.5±0.9	1.71±0.07	67±3
	dead and dying	12.6±0.9	17.6±1.2	–	–	1.25±0.08	76±3
26B	living	20.0±0.7	24.5±2.2	15.0±2.0	10.9±0.6	1.27±0.07	70±2
	dead and dying	6.6±3.7	35.4±7.1	–	–	–	113±57
15Sp	living	23.4±1.5	30.6±3.4	8.6±1.7	13.0±1.4	1.59±0.10	81±4
	dead and dying	9.7±1.6	14.5±4.0	–	–	1.06±0.07	65±12
3S	living	23.1±0.5	31.2±3.1	7.9±3.2	12.1±0.8	1.74±0.06	69±7
<i>Itatka, 30×50 m; altitude (a.s.l.) – 152 m; AWTS – 1.8 units; density – 625 trees/ha</i>							
73F	living	23.9±0.3	30.4±0.7	8.7±0.4	12.7±0.3	2.38±0.07	66±1
	dead and dying	16.2±2.0	28.0±1.9	–	–	1.97±0.12	78±2
16B	living	20.2±0.6	19.5±1.0	11.6±2.3	9.8±0.5	1.69±0.07	62±2
7Sp	living	24.0±1.2	31.5±3.5	14.9±3.5	13.2±1.5	2.14±0.11	67±4
2S	living	20.3±0.5	28.4±2.0	9.7±0.5	12.0±0.5	2.28±0.13	71±5
1P	living	23.1	44.1	18.2	11.2	2.76±0.15	75
1A	living	24.3	19.2	3.4	12.1	1.94±0.19	79

Stand composition explication: F – Siberian fir; S – Siberian pine; Sp – Siberian spruce; P – Scots pine; B – Silver birch; A – Aspen.

Reconstruction of stand history

The forest use history of the respective sites was reconstructed taking into account the age structure of the communities, the species composition and the distribution of trees by height and diameter. The presence of traces from logging were also taken into account. Stumps were assessed with regard to tree species, the diameter at the ground level was measured and their density was calculated. The mapping of stumps on the SP Malinovka made it possible to estimate the degree of anthropogen-

ic impact to the forest ecosystem. We calculated the number of sawed stumps and stumps formed as a result of the natural death of trees.

The processing of the material was carried out in the STATISTICA 10 program. In addition to the standard descriptive statistics, the non-parametric Mann–Whitney test and the Kruskal–Wallis test were used to test significance of the respective parameter with the level of $p < 0.05$.

Characterisation of type and intensity of the bark beetle infestation: non-spatial event analysis

We characterised the infestation by weight (originally denoted as thinning weight, rG ratio) and type (originally denoted as thinning types, NG ratio) [17]. The infestation weight reflects the intensity of the bark beetle attack on the stand level. The NG ratio indicates the infestation type, for example, if trees with relatively larger or smaller diameter were killed by the bark beetle. Values below 1 indicate that especially strong trees were killed; values higher than 1 indicate that mostly trees with smaller diameter were affected. A value near 1 indicates that the proportion of removed stems was proportional to the removed basal area:

$$rG = \frac{G_r}{G_t}; \quad (2)$$

$$NG = \frac{N_r / N_t}{G_r / G_t}, \quad (3)$$

where rG – infestation weight; G_r – removed basal area, m^2/ha ; G_t – total basal area, m^2/ha ; NG – infestation type; N_r – removed stem number; N_t – total stem number.

Since the bark beetle is selective with regard to species, we elaborated rG and NG only for the fir tree population in each sample plot (rG_{fir} and NG_{fir}).

Analysis of the bark beetle infestation on spatial forest structure

We analysed the tree distribution pattern of the samples with the help of the univariate cumulative and non-cumulative distribution functions. With regard to recently conducted research of undisturbed fir forests in Mongolia [19], we initially assumed predominantly random tree distribution patterns on our fir forest sample plots. We assumed that the *Polygraphus proximus* invasion has changed some parameter of the horizontal tree distribution pattern in the fir forests and that we may find traces of a structural pattern of the infestation (e.g., attack on neighbouring trees). Based on previous studies and our assumptions, we tested the hypothesis of complete spatial randomness for all living trees, all living firs and dead firs. We used the square-root transformation of the univariate $K11$ -function, called univariate cumulative L -function $L(r)$ [10, 45]. The 95 % confidence envelope was constructed using the Monte Carlo method [42]. A total of 999 Poisson patterns were simulated for each data set. The null hypothesis of this model assumes that the tree distributions of all plots follow a homogeneous Poisson process across the entire distance [15, 42] with $r_{max} = 14$ m. The pattern is defined as clumped, random or regular if the L -values at distance r are greater than, equal to or lower than the confidence envelopes, respectively:

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r, \quad (4)$$

where $L(r)$ – univariate cumulative L -function, $L(r) = 0$ for $r \geq 0$; $K(r)$ – the first derivative of Ripley's K -function; π – mathematical constant; r – distance, m.

Additionally, we cross-checked the results of the interpretation with the complementary univariate non-cumulative pair correlation function $g(r)$ [45], which shows the non-cumulative classification. The simulations (999) were computed for deriving critical values for $\alpha = 0.05$ for each data set:

$$g(r) = \frac{dK(r)}{dr} / (2\pi r), \quad (5)$$

where $g(r)$ – univariate non-cumulative pair correlation function, $g(r) = 1$ for $r \geq 0$; dK – the density function of $K(r)$; dr – density, trees/ha.

*Testing the hypothesis of spatial independence between living and dead/severely weakened fir trees after the *Polygraphus proximus* invasion*

Additionally, we wanted to know if there is any significant spatial relation between living firs and firs that have been killed or severely weakened by the bark beetle. Therefore, we tested the spatial independence between these two groups with simulations that involved random shifts of one component pattern relative to the other, called toroidal shifts. We used the bivariate cumulative $L12$ -function $L12(r)$ [45]. Additionally, we cross-checked the results for the interpretation with the complementary bivariate non-cumulative pair correlation function $g12(r)$ [45]. Attraction, spatial independence or repulsion is indicated if the pair correlation function values at the distance r are greater than, equal to or lower than the 95 % confidence envelopes, respectively. The simulations (999) were computed for deriving critical values for $\alpha = 0.05$ for each data set.

Spatial analysis of the relative dominance of trees species with the measure of surround U_i

In order to test our hypothesis that suppressed trees are more likely to be intensively attacked and killed by the bark beetle, we analysed the relative social status of the trees. The social status of a tree (relative dominance of suppression) depends on the individual tree neighbourhood. In the frame of this study, one objective is to assess the relative dominance with regard to tree species and tree health status with reference to *Polygraphus proximus*. The measure of surround U_i is an index for classifying the size of tree i in comparison to its next four neighbours. The original classification was presented by Gadow and Hui [17, 21]. In our study, we applied the scaling according to Gradel and Mühlenberg [19] that was proposed in order to logically match the U_i values to other index values of spatial forest structure (lower index values indicate a lower status of the respective parameter). With regard to U_i , it means that a relatively smaller size reference tree i compared to a neighbour tree j equals a classified value of 0; relatively larger size equals a classified value of 1. For the calculation, see equation 6 (see Fig. 2 for examples):

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j, \quad (6)$$

where U_i – index for classifying the size of tree i , $0 \leq U_i \leq 1$; v_j – the respective value of i 's neighbour j , $0 \leq v_j \leq 1$; (0 – neighbour j is larger than the reference tree i , 1 – otherwise).

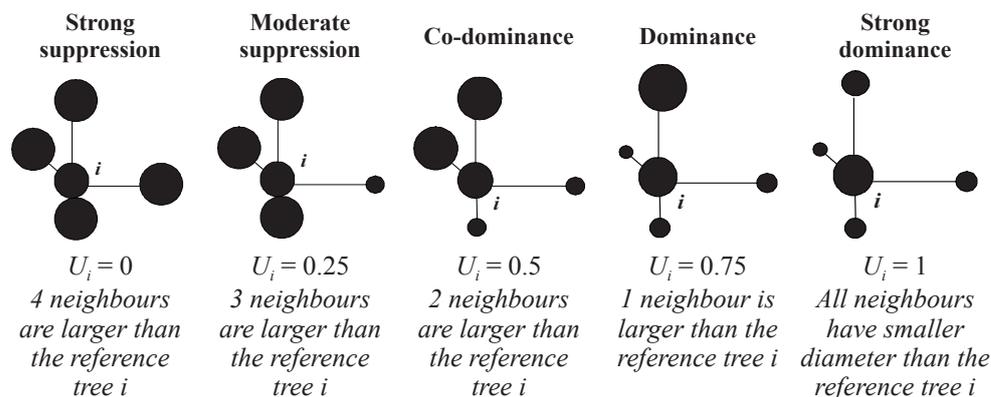


Fig. 2. A four-tree neighbourhood sample provides five options for the U_i value (assessment of dominance); based on Gadow and Hui [17] and adjusted according to Gradel and Mühlenberg [19]

In order to get a realistic picture, we analysed the social status of each tree (relative dominance or suppression) in 2014, when the bark beetle infestation took place, and four years later in 2018. We compared the obtained values of living to dead/severely weakened trees. Diameter size for 2014 was calculated with the help of wood cores cut in 2018. The analysis was conducted with R-statistics 3.5.1 with the spatstat package [7].

Results

Status of basic stand structure as of 2018

The forest stand of the SP Itatka is part of a mixed forest stand with a predominance of Siberian fir and a significant participation of Silver birch. To less extend Siberian spruce and Siberian pine are also present (Table 1). The age structure allows us to distinguish two generations. The first generation consists of largely dead Silver birch over 100 years old. The age of the second generation ranges from 65 to 80 years. Consequently, the second generation appeared when the age of the first generation was 30 to 40 years. Given the location of the site near the village (up to 1 km) and the time of establishment of the village of Itatka (1884), it can be assumed that the first generation arose on the site after the felling. Subsequently, under the canopy of the pioneer trees (birch), the dark conifers established. Since the site was periodically subjected to selective felling, the occasionally establishment of deciduous species there started again.

The stand of the SP Malinovka is also part of a mixed forest stand, but with a large participation of Siberian fir and a significant proportion of Silver birch. The composition also includes Siberian spruce and Siberian pine, rarely Scots pine and Aspen also occur. The age structure is homogeneous and consists of one generation of 60–70 years. Given that the site is located directly on the outskirts of the village Malinovka (established in 1891), it can be assumed that the first generation was cut down during the time of the establishment of the village in the form of clear-cutting. A continuous anthropogenic impact is indicated by the almost complete absence of dead trees on the SP Malinovka, while on the SP Itatka they are found for almost all tree species.

Despite the similar characteristics of the tree canopy, the model stands can be attributed to two different stages of the forest-forming process of fir forests. This is clearly seen in Fig. 3. The forest stand of the SP Itatka is at an earlier stage compared to the community of the SP Malinovka. Proof of this is the much greater density of

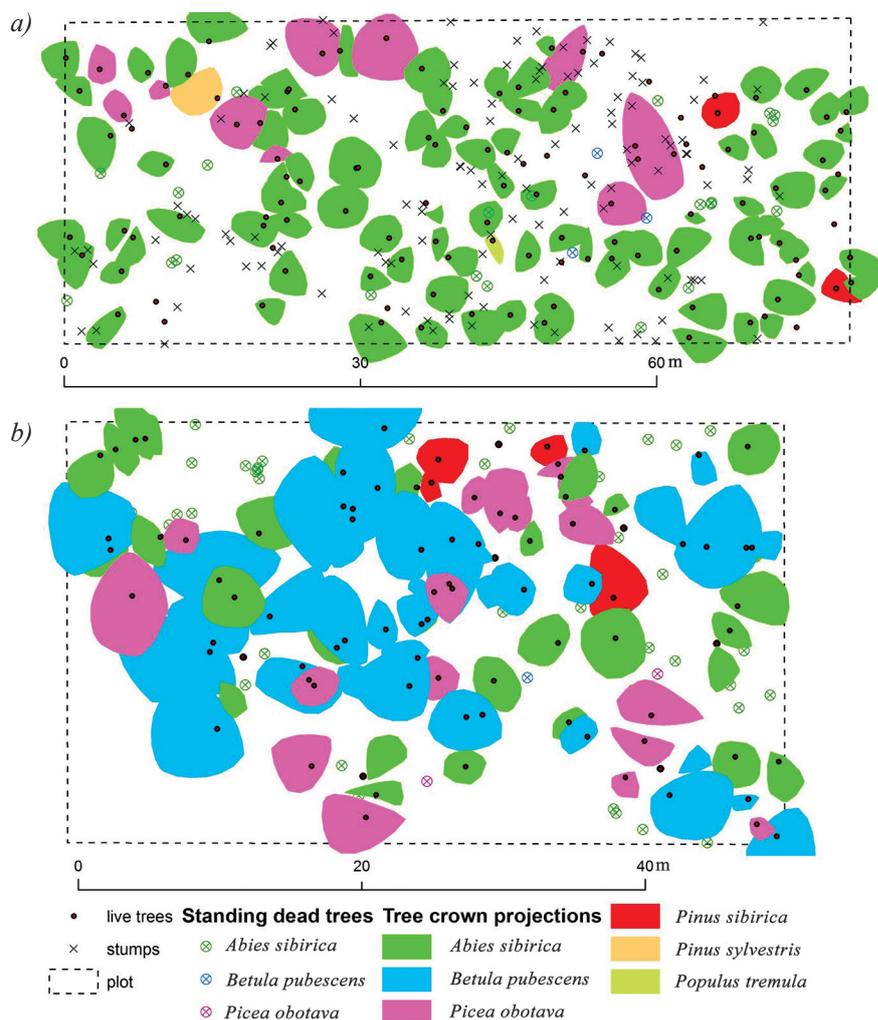


Fig. 3. Tree maps indicating positions of living trees, crown projections of living trees and trees recently killed by the invasive bark beetle: a) – SP Malinovka; b) – SP Itatka

the stand (37 %), with respectively smaller average values: height (23 %), diameter (21 %) and the value of the trunk growth (28 %) in living trees of Siberian fir. A distinctive feature is that the fir on the SP Itatka only goes to the first layer of the forest stand, and on the SP Malinovka, it has confidently taken a dominant position in the tree canopy. Thus, it is logical to assume that the forest stand of the SP Itatka is experiencing more stress due to more intense competition, and therefore, should be more affected by the impact of the invasive beetle. A comparison of the AWTS index (3.0 for Itatka and 1.8 for Malinovka) confirms this assumption.

Dead wood in the Malinovka stands

On the SP Malinovka, we also mapped all the stumps and it turned out that there are about 504 pcs/ha. At the same time, 76 % show characteristic traces of saws and only 24 % originated as a result of breakdown, which indicates a natural origin. Fir accounts for the largest part (94 %), then birch (6 %). According to the degree of decomposition, 48 % of stumps are classified into the second category, 26 % to the third, 12 % to the fourth, 6 % to the fifth and 2 % to the sixth.

The diameter of the sawed stumps is 24.6 ± 0.9 cm, which is significantly (Mann–Whitney, test $p = 0.0001$) larger than the size of the stumps formed as a result of natural causes (16.9 ± 1.4 cm). We found no significant differences in stump diameter with regard to the degree of decomposition (Kruskal–Wallis test, $p = 0.4249$). The size of sawn stumps meets the generally accepted requirements for private construction wood, indicating something about the purpose of the logging on the site.

The impact of the four-eyed fir bark beetle at the stand level

Our analysis showed that on the SP Itatka, the height and diameter of fir trees killed or severely weakened in attacks by the four-eyed fir bark beetle were significantly lower than in live individuals (Mann–Whitney test, $p = 0.0153$ and $p = 0.0022$, respectively). With regard to tree age, no connection was found. Also, dead firs showed low growth of the trunk compared to living trees (Mann–Whitney test, $p = 0.0153$). Dead and severely weakened firs of the SP Malinovka also had lower height and diameter values compared to living trees (Mann–Whitney test, $p = 0.0001$ and $p = 0.0536$, respectively). The radial increment of dead/severely weakened firs was lower than that of living firs (Mann–Whitney test, $p = 0.0025$). Certain parameters, such as the crown projection and length were not analysed since they cannot be compared to the same parameters of dead trees.

The height of the tree canopy on the SP Itatka is 16.86 ± 0.61 m and the crowns of the trees begin at a height of 9.07 ± 0.38 m. Comparing the height of dead trees, it can be noted that fir grew to the middle of the crown space, but spruces did not survive the competition and immediately began to die. The height of the tree canopy on the SP Malinovka is 22.22 ± 0.44 m and the crowns of the trees begin at a height of 10.86 ± 0.41 m. Comparing the height of the dead firs, it can be noted that they also grew to the middle of the crown space. The beginning and the process of ingrowth into the upper canopy is a critical time and the trees are more susceptible to external impacts.

The non-spatial event analysis showed that, considering only fir trees, the intensity was much stronger on the SP Itatka (rG_{fir} with 0.375), although the effect of the infestation with regard to size classes was not too different in Malinovka and Itatka. However, the NG_{fir} ratio of fir (NG_{fir}), shows that more often smaller firs rather than larger firs were affected by the infestation (Fig. 4).

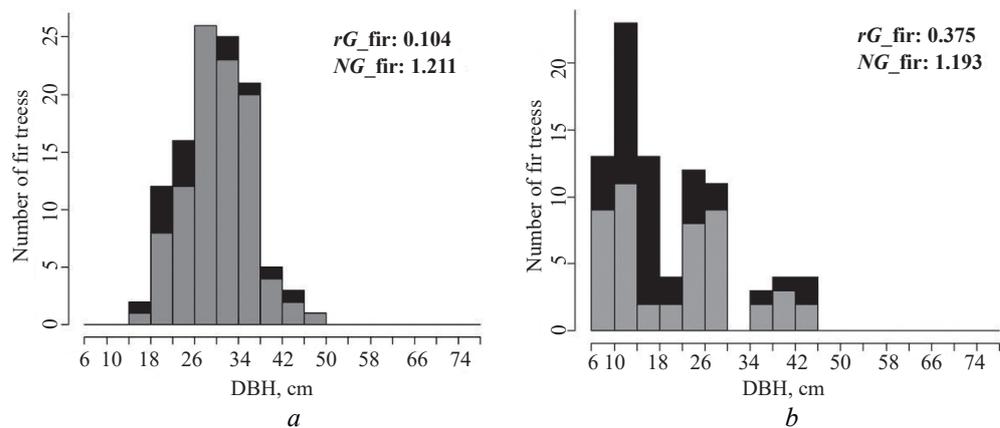


Fig. 4. Non-spatial event analysis of the RS Malinovka (a) and Itatka (b): grey – fir trees that were not attacked; black – fir trees severely attacked; rG_{fir} – infestation weight on fir trees; NG_{fir} – infestation type on fir trees

Relative dominance and suppression of tree species

The analysis of the social status of the trees showed, that individuals of *Pinus sibirica* are largely dominant, whereas the other three species are only co-dominant (Table 2).

Table 2

Overview of the species-specific classification of the social status of the trees in the SP Itatka and of fir trees killed or severely weakened by *Polygraphus proximus*

SP	Year	U_i					
		all trees (attacked and not attacked)				trees severely attacked by <i>Polygraphus proximus</i>	
		<i>Pinus sibirica</i>	<i>Picea obovata</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Abies sibirica</i>	<i>Abies sibirica</i> *	<i>Abies sibirica</i> **
Itatka	2014	0.813	0.526	0.578	0.435	0.486	0.481
	2018	0.813	0.526	0.590	0.439	0.382	0.282
Malinovka	2014	0.750	0.531	0.300	0.572	0.438	0.250
	2018	0.750	0.500	0.300	0.578	0.458	0.375

* Killed or severely weakened with participation of *Polygraphus proximus*.

** Killed or severely weakened only by *Polygraphus proximus*.

Classification of U_i values: $U_i = 0$ (strong suppression); $U_i = 0.25$ (moderate suppression); $U_i = 0.5$ (co-dominance); $U_i = 0.75$ (dominance); $U_i = 1$ (strong dominance); The classification is based on Gadow and Hui [17] and adjusted according to Gradel and Mühlenberg [19].

Interestingly, the social status of fir trees killed or severely weakened only by *Polygraphus proximus* was much lower than the status of all fir trees of the SP Malinovka. In the SP Itatka, however, the status of all groups was relatively similar in 2014, but in 2018, the status of all fir trees had become clearly higher than that of killed/severely weakened trees. Overall, the results suggest that suppressed firs are more susceptible to being killed by the bark beetle. Also, in the SP Itatka, the social status of the attacked trees decreased further. In the SP Malinovka, it slightly increased, but the number of attacked individuals is relatively low compared to the SP Itatka, which lowers the relevance of the results of the SP Malinovka.

The impact of the four-eyed fir bark beetle on the horizontal tree distribution pattern

Spatial distribution of the living tree population (all species) was evaluated as being mostly random over the entire distance of the SP Malinovka (Fig. 5).

However, on the SP Itatka (Fig. 6), a clumped distribution pattern of the entire tree population was indicated after a distance of 6 m by the univariate cumulative $L(r)$. Both figures 5 and 6 show dead or severely weakened firs; death caused or triggered by the four-eyed fir bark beetle.

On both sample plots, the hypothesis of complete spatial randomness of the tree distribution pattern of the remained living firs was accepted by the analysis with the univariate cumulative L -function $L(r)$. The univariate non-cumulative pair correlation function $g(r)$, however, indicated a clumped distribution of the living firs at a distance of 1 m on the SP Itatka. In contrast to the distribution pattern of living firs, the pattern of dead and severely weakened firs by the four-eyed

fir bark beetle was significantly clumped over short (SP Itatka and SP Malinovka) or, to some extent, larger distances (SP Itatka), irrespective of the succession stage. This finding coincides with visual observations in other stands – that attacked trees are to some extent grouped. However, the hypothesis of spatial independence of the tree positions of living and dead/severely weakened firs was accepted for both plots.

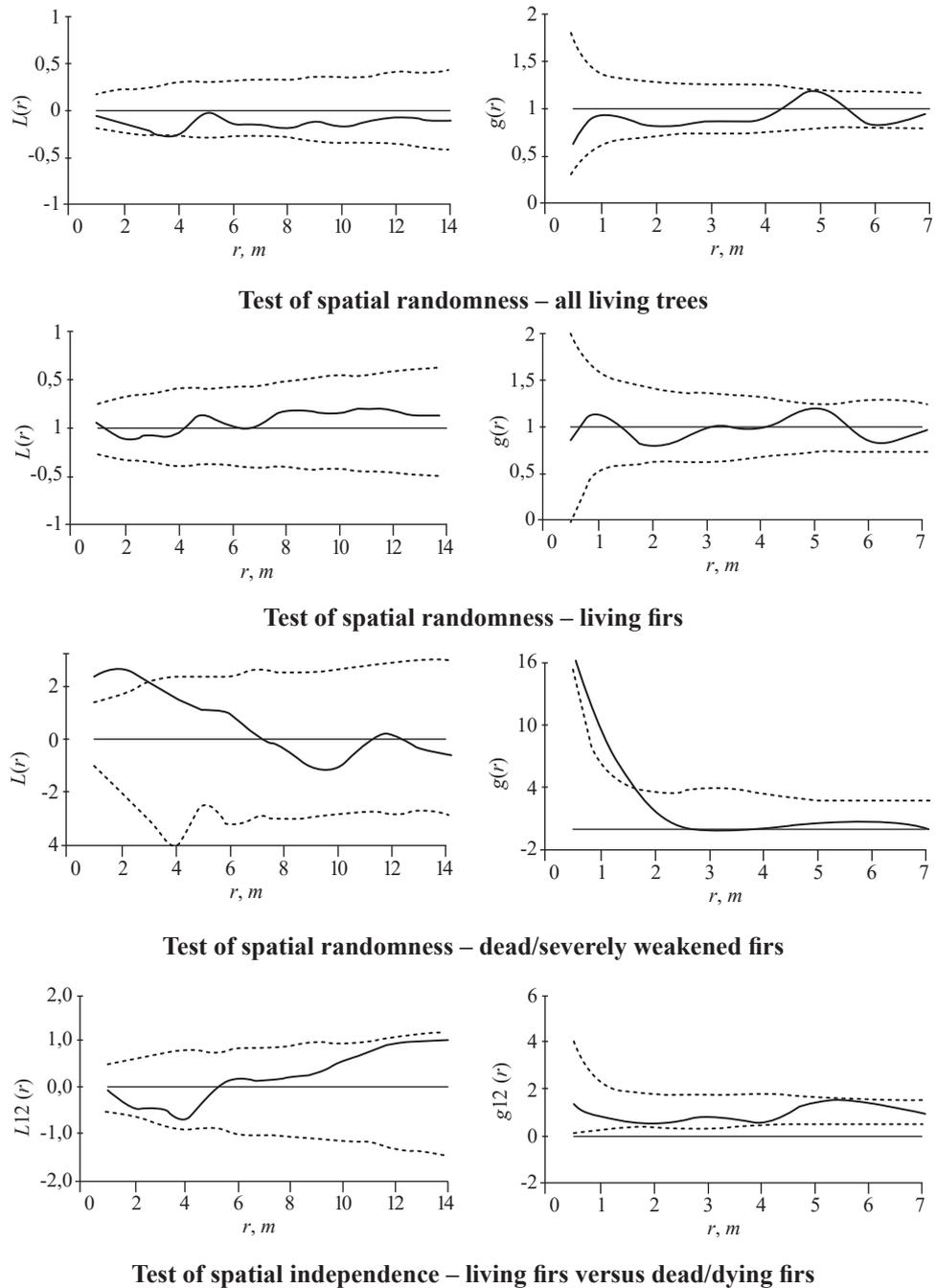


Fig. 5. L -functions and pair correlation functions of the analyses of the horizontal spatial forest structure of the SP Malinovka

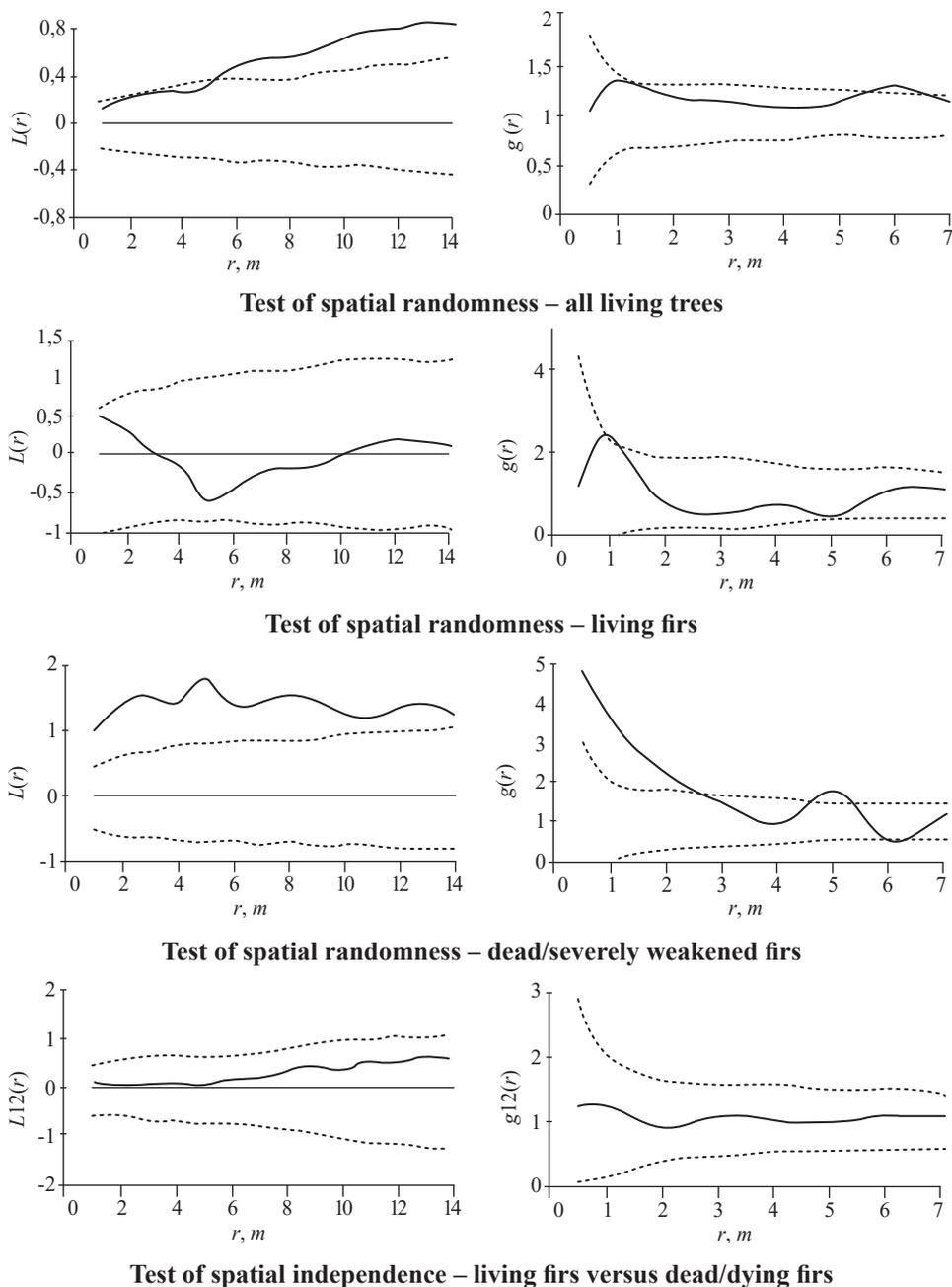


Fig. 6. L -functions and pair correlation functions of the analyses of the horizontal spatial forest structure of the SP Itatka

Discussion

Based on our results, we discuss the preferences and pattern of *Polygraphus proximus* attacks.

Compared to living firs, dead trees exhibited, on average, lower height and diameter values. These features are noted by other authors [8], which allows us to consider the tree diameter as being a main indicator of susceptibility to damage at

the stand level [9]. However, larger diameters usually exhibit thicker bark. Therefore, we assume that bark thickness may play a role in the susceptibility of the trees. Bark protects the tree against external abiotic and biotic disturbances. For example, tree species with thicker bark are considered to be better protected against fire damage than species with thinner bark [32]. Recently, the close association of fire-driven ecosystems and tree species with thick bark at a global scale across different vegetation zones was shown [35]. Fir and spruce are climax species with rather thin bark. This may be due to the fact that fires in dark taiga ecosystems are naturally less common compared to disturbance-prone larch and birch forests [19]. For a bark beetle, however, bark represents a barrier that it has to overcome. Another barrier for the beetle is resin. Vital and strong trees produce more resin and are, therefore, better protected. In this context, vitality and most likely diameter size play a role as well. Since diameter size plays a crucial role for susceptibility against the beetle, the development stage of the stand is also important. Fir stands with left-sided ontogenetic structure appear to be more resistant [3].

Our results suggest that the most critical period is when the fir trees grow into the upper layer of the stand. At this stage, *Polygraphus proximus* is able to cause maximum damage and interrupt the forest-forming process of fir or, if there is a sufficient amount of viable undergrowth of fir, roll back the succession cycle of its dominance for several decades. In any case, the decrease in canopy cover stimulates the growth of saplings [38]. This shows how insect outbreaks can be a driver of forest dynamics.

Suppressed trees are more frequently successfully attacked and weakened by the bark beetle

Our results of the spatial analysis are consistent with previously established features of the impact of *Polygraphus proximus* and indicate the predominant influence of the invader on suppressed trees [4]. A recent generalisation on the invasion of bark beetle *Phloeosinus aubei* in the Czech Republic [16], which began in the 1950s, also suggests that mainly trees with reduced viability were damaged. The nature of the impact of *Polygraphus proximus* in the periods between outbreaks of mass reproduction is similar. Generally, two types of infestations can clearly be distinguished in the activity of bark beetles. The first type refers to the normal population activity; in our case the polygraph kills the weakest trees. The second type is when the entire stand is weakened. Then, the beetle successfully attacks those trees that were recently viable and could withstand it. In years of mass reproduction, the beetle is able to damage vital trees, as it was shown by the example of the analysis of the social status of fir trees on the SP Itatka. Therefore, the four-eyed fir bark beetle can be considered as a dangerous pest of the forest. It needs to be understood that periods of mass reproduction are due to the general weakening of stands related to climate change or extreme weather events [40]. During such periods (for example droughts), almost all the trees in the stands are weakened to some extent.

The infestation is a disturbance that influences the horizontal tree distribution pattern

It appears that uneven-aged near-natural fir forests mostly exhibit random tree distribution patterns. This, however, also depends on the development stage and disturbance history. Younger stands will be more clumped; regeneration often exhibits clumped distribution. Random or partly-clumped tree distribution patterns were found in near-natural fir-beech forests and spruce forests in Central Europe [20, 23]. Random tree distribution patterns were found in undisturbed Mongolian dark taiga for-

ests [2, 19]. Our data confirmed this to some extent for the respective samples of Siberian fir forests in Tomsk region. It is well known that different disturbances affect forest structure [29], but there are hardly any studies available that evaluated the impact of a bark beetle infestation on spatial forest structure. We found that the impact of *Polygraphus proximus* on fir trees tends to occur in clusters. This was repeatedly recorded in the stands that were subjected to the initial attack of the invader. Stereńczak et al. [41] found that the dying of spruce trees during the pandemic mass reproduction of the bark beetle *Ips typographus* in the Białowieża Forest took place in groups.

Based on our results, it may be possible to develop a scheme for zoning the secondary (invasive) range of *Polygraphus proximus* according to the degree of its susceptibility. This zonation may help to implement required forestry measures for increasing stand stability and resilience against potential infestations. A somewhat similar model approach, that included some characteristics of forest stands, has been carried out with respect to Mountain pine beetle infestations in Western Canada [14].

Conclusion

Our analysis showed that both height and diameter of fir trees killed in attacks by the four-eyed fir bark beetle were significantly lower than in live individuals. Also, dying firs showed lower growth of the trunk compared to vital living trees. Comparing the height of dead trees, it can be noted that firs grew to the middle of the crown space, but spruce did not survive the competition and immediately begin to die. The analysis of the social status of the trees during the infestation in 2014 showed that the status of fir trees seriously attacked or killed by *Polygraphus proximus* is relatively even or lower (more suppressed) than the status of all fir trees. Overall, *Polygraphus proximus* attacks are concentrated on relatively smaller and neighbouring trees. In contrast to the distribution pattern of living firs, the pattern of dying firs, attacked by the four-eyed fir bark beetle, was significantly clumped over short distances (SP Itatka and SP Malinovka). This finding coincides with visual observations in other stands, that is, dead trees are to some extent grouped and are in close proximity to each other. Some parameters analysed in this study may be useful for forecasting or modelling stand susceptibility of fir stands against *Polygraphus proximus* in the region, which in turn, would allow implementation of management practices for increasing stand stability or resilience against infestations.

REFERENCES

1. Гниненко Ю.И., Ширяева Н.В., Щуров В.И. Самшитовая огневка – новый инвазивный организм в лесах российского Кавказа // Карантин растений. Наука и практика. 2014. № 1(7). С. 32–39. [Gninenko Yu.I., Shiryayeva N.V., Shchurov V.I. The Box Tree Moth – A New Invasive Pest in the Caucasian Forests. *Karantin rasteniy. Nauka i praktika* [Plant Health. Research and Practice], 2014, no. 1(7), pp. 32–39].

2. Градель А., Воинков А.А., Алтаев А.А., Энхтуяа Б. Пространственно-структурный анализ ненарушенной темнохвойной тайги в южной таежной зоне и интервальная оценка темнохвойного смешанного леса в горной лесостепной зоне (Монголия) // Тр. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2018. № 4(73). С. 36–44. [Gradel A., Voinkov A.A., Altaev A.A., Enkhtuya B. A Spatio-Structural Analysis of Intact Dark Taiga in the Southern Taiga Zone and an Interval Assessment of a Dark Conifer Mixed Forest in the Mountain Forest Steppe Zone (Mongolia). *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of

the Kuban State Agricultural University], 2018, vol. 4(73), pp. 36–44]. DOI: [10.21515/1999-1703-73-36-44](https://doi.org/10.21515/1999-1703-73-36-44)

3. Дебков Н.М. Влияние уссурийского полиграфа на онтогенетическую структуру пихтовых лесов Западной Сибири // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 116–125. [Debkov N.M. Four-Eyed Fir Bark Beetle Influence on the Ontogenetic Structure of Fir Forests in Western Siberia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 116–125]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2018.5.116](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.116), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d21/116_125.pdf

4. Дебков Н.М. Закономерности изменения структуры пихтовых лесов, поврежденных в результате инвазии уссурийского полиграфа // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 13–22. [Debkov N.M. Regularities of Changes in the Structure of Fir Forests Damaged as a Result of the Invasion of *Polygraphus proximus*. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2018, vol. 8, no. 1(29), pp. 13–22]. DOI: [10.12737/article_5ab0dfbaccc16.33568232](https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbaccc16.33568232)

5. Aukema J.E., McCullough D.G., Von Holle B., Liebhold A.M., Britton K., Franckel S.J. Historical Accumulation of Nonindigenous Forest Pests in the Continental United States. *BioScience*, 2010, vol. 60, iss. 11, pp. 886–897. DOI: [10.1525/bio.2010.60.11.5](https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.11.5)

6. Bacon S.J., Bacher S., Aebi A. Gaps in Border Controls are Related to Quarantine Alien Insect Invasions in Europe. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7(10), art. e47689. DOI: [10.1371/journal.pone.0047689](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047689)

7. Baddeley A., Rubak E., Turner R. *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*. London, CRC Press, 2015. 828 p.

8. Balzotti C.S., Asner G.P. Episodic Canopy Structural Transformations and Biological Invasion in a Hawaiian Forest. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, art. 1256. DOI: [10.3389/fpls.2017.01256](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01256)

9. Bellahirech A., Branco M., Catry F.X., Bonifácio L., Sousa E., Ben Jamâa M.L. Site- and Tree-Related Factors Affecting Colonization of Cork Oaks *Quercus suber* L. by Ambrosia Beetles in Tunisia. *Annals of Forest Science*. 2019, vol. 76, iss. 2, art. 45. DOI: [10.1007/s13595-019-0815-1](https://doi.org/10.1007/s13595-019-0815-1)

10. Besag J. Contribution to the Discussion of Dr. Ripley's Paper. *Journals of the Royal Statistical Society*, 1977, vol. B39, pp. 193–195.

11. Binimelis R., Born W., Monterroso I., Rodríguez-Labajos B. Socio-Economic Impact and Assessment of Biological Invasions. *Biological Invasions*. Ed. by W. Nentwig. Berlin, Springer, 2007, pp. 331–347. DOI: [10.1007/978-3-540-36920-2_19](https://doi.org/10.1007/978-3-540-36920-2_19)

12. Bobiec A. Living Stands and Deadwood in the Białowieża Forest: Suggestions for Restoration Management. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 165, iss. 1-3, pp. 125–140. DOI: [10.1016/S0378-1127\(01\)00655-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00655-7)

13. Born W., Rauschmayer F., Bräuer I. Economic Evaluation of Biological Invasions – A Survey. *Ecological Economics*, 2005, vol. 55, iss. 3, pp. 321–336. DOI: [10.1016/j.ecolecon.2005.08.014](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.08.014)

14. Coggins S.B., Coops N.C., Wulder M.A. Initialization of an Insect Infestation Spread Model Using Tree Structure and Spatial Characteristics Derived from High Spatial Resolution Digital Aerial Imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 34, iss. 6, pp. 485–502. DOI: [10.5589/m08-073](https://doi.org/10.5589/m08-073)

15. Corral-Rivas J., Pommerening A., Gadaw K.V., Stoyan D. An Analysis of Two Directional Indices for Characterizing the Spatial Distribution of Forest Trees. *Models of Tree Growth and Spatial Structure for Multispecies, Uneven-Aged Forests in Durango (Mexico)*. Göttingen, Cuvillier, 2006, pp. 119–134.

16. Fiala T., Holuša J. Occurrence of the Invasive Bark Beetle *Phloeosinus aubei* on Common Juniper Trees in the Czech Republic. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 1, art. 12. DOI: [10.3390/f10010012](https://doi.org/10.3390/f10010012)

17. Gadow K., Zhang C.Y., Wehenkel C., Pommerening A., Corral-Rivas J., Korol M., Myklush S., Hui G.Y., Kiviste A., Zhao X.H. Forest Structure and Diversity. *Continuous Cover Forestry*. Ed. by Pukkala T., Gadow K. Dordrecht, Springer, 2012, pp. 29–83. DOI: [10.1007/978-94-007-2202-6_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2202-6_2)
18. Gradel A., Ammer C., Ganbaatar B., Nadaldorj O., Dovdondemberel B., Wagner S. On the Effect of Thinning on Tree Growth and Stand Structure of White Birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) and Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in Mongolia. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 4, art. 105. DOI: [10.3390/f8040105](https://doi.org/10.3390/f8040105)
19. Gradel A., Mühlenberg M. Spatial Characteristics of Near-Natural Mongolian Forests at the Southern Edge of the Taiga. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*, 2011, vol. 182, no. 3/4, pp. 40–52.
20. Hofmeister Š., Svoboda M., Souček J., Vacek S. Spatial Pattern of Norway Spruce and Silver Fir Natural Regeneration in Uneven-Aged Mixed Forests of Northeastern Bohemia. *Journal of Forest Science*, 2008, vol. 54, iss. 3, pp. 92–101. DOI: [10.17221/2/2008-JFS](https://doi.org/10.17221/2/2008-JFS)
21. Hui G. Studies on the Application of Stand Spatial Structure Parameters Based on the Relationship of Neighborhood Trees. *Beijing Linye Daxue Xuebao* [Journal of Beijing Forestry University], 2013, vol. 35(4), pp. 1–8.
22. Hui G.Y., Hu Y.B. Measuring Species Spatial Isolation in Mixed Forests. *Forest Research*, 2001, vol. 14(1), pp. 23–27. DOI: [10.3321/j.issn:1001-1498.2001.01.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1498.2001.01.004)
23. Janík D., Adam D., Hort L., Král K., Šamonil P., Unar P., Vrška T. Tree Spatial Patterns of *Abies alba* and *Fagus sylvatica* in the Western Carpathians over 30 Years. *European Journal of Forest Research*, 2014, vol. 133, iss. 6, pp. 1015–1028. DOI: [10.1007/s10342-014-0819-1](https://doi.org/10.1007/s10342-014-0819-1)
24. Kenis M., Auger-Rozenberg M.-A., Roques A., Timms L., Péré C., Cock M.J.W., Settele J., Augustin S., Lopez-Vaamonde C. Ecological Effects of Invasive Alien Insects. *Biological Invasions*, 2009, vol. 11, no. 1, pp. 21–45. DOI: [10.1007/s10530-008-9318-y](https://doi.org/10.1007/s10530-008-9318-y)
25. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Yagunov M.N. Decline of Dark Coniferous Stands in Baikal Region. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, vol. 9, no. 5, pp. 617–625. DOI: [10.1134/S1995425516050073](https://doi.org/10.1134/S1995425516050073)
26. Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 8, art. 301. DOI: [10.3390/f8080301](https://doi.org/10.3390/f8080301)
27. Kraft N.J.B., Ackerly D.D. Functional Trait and Phylogenetic Tests of Community Assembly across Spatial Scales in an Amazonian Forest. *Ecological Monographs*, 2010, vol. 80, no. 3, pp. 401–422.
28. Krivets S.A., Bisirova E.M., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. Transformation of Taiga Ecosystems in the Western Siberian Invasion Focus of Four-Eyed Fir Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). *Russian Journal of Biological Invasions*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 94–108. DOI: [10.1134/S2075111715020058](https://doi.org/10.1134/S2075111715020058)
29. Kuuluvainen T., Grenfell R. Natural Disturbance Emulation in Boreal Forest Ecosystem Management – Theories, Strategies, and a Comparison with Conventional Even-Aged Management. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42(7), pp. 1185–1203. DOI: [10.1139/x2012-064](https://doi.org/10.1139/x2012-064)
30. Larsson T., Angelstam P., Balent G., Barbati A., Bijlsma R., Boncina A. et al. Biodiversity Evaluation Tools for European Forests. *Ecological Bulletins*, 2001, no. 50, pp. 1–237.
31. Lei X., Lu Y., Peng C., Zhang X., Chang J., Hong L. Growth and Structure of Semi-Natural Larch-Spruce-Fir (*Larix olgensis* – *Picea jezoensis* – *Abies nephrolepis*) Forests in Northeast China: 12-Year Result after Thinning. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 240, iss. 1-3, pp. 165–177. DOI: [10.1016/j.foreco.2006.12.019](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.019)
32. Martinsson O., Lesinski J.A. *Siberian Larch: Forestry and Timber in a Scandinavian Perspective*. Bispgården, JiLU Jämtland County Council, Institute of Rural Development, 2007. 90 p.

33. Naumburg E., DeWald L.E. Relationships between *Pinus ponderosa* Forest Structure, Light Characteristics, and Understorey Graminoid Species Presence and Abundance. *Forest Ecology and Management*, 1999, vol. 124, iss. 2-3, pp. 205–215. DOI: [10.1016/S0378-1127\(99\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00067-5)
34. Pastorella F., Paletto A. Stand Structure Indices as Tools to Support Forest Management: An Application in Trentino Forests (Italy). *Journal of Forest Science*, 2013, vol. 59, pp. 159–168. DOI: [10.17221/75/2012-JFS](https://doi.org/10.17221/75/2012-JFS)
35. Pellegrini A.F., Anderegg W.R.L., Paine C.E.T., Hoffmann W.A., Kartzinel T., Rabin S.S., Sheil D., Franco A.C., Pacala S.W. Convergence of Bark Investment According to Fire and Climate Structures Ecosystem Vulnerability to Future Change. *Ecology Letters*, 2017, vol. 20, iss. 3, pp. 307–316. DOI: [10.1111/ele.12725](https://doi.org/10.1111/ele.12725)
36. Pretzsch H. Analysis and Modeling of Spatial Stand Structures. Methodological Considerations Based on Mixed Beech-Larch Stands in Lower Saxony. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 97, iss. 3, pp. 237–253. DOI: [10.1016/S0378-1127\(97\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00069-8)
37. Rinn F. *TSAP V3.5. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation*. Heidelberg, Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
38. Rozendaal D.M.A., Kobe R.K. A Forest Tent Caterpillar Outbreak Increased Resource Levels and Seedling Growth in a Northern Hardwood Forest. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, art. e0167139. DOI: [10.1371/journal.pone.0167139](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167139)
39. Sallabanks R., Riggs R.A., Cobb L.E. Bird Use of Forest Structural Classes in Grand Fir Forests of the Blues Mountains, Oregon. *Forest Science*, 2002, vol. 48, iss. 2, pp. 311–321. DOI: [10.1093/forestscience/48.2.311](https://doi.org/10.1093/forestscience/48.2.311)
40. Stephenson N.L., Das A.J., Ampersee N.J., Bulaon B.M., Yee J.L. Which Trees Die during Drought? The Key Role of Insect Host-Tree Selection. *Journal of Ecology*, 2019, vol. 107, iss. 5, pp. 2383–2401. DOI: [10.1111/1365-2745.13176](https://doi.org/10.1111/1365-2745.13176)
41. Stereńczak K., Mielcarek M., Modzelewska A., Kraszewski B., Fassnacht F.E., Hilszczański J. Intra-Annual *Ips typographus* Outbreak Monitoring Using a Multi-Temporal GIS Analysis Based on Hyperspectral and ALS Data in the Białowieża Forests. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 442, pp. 105–116. DOI: [10.1016/j.foreco.2019.03.064](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.064)
42. Stoyan D., Stoyan H. *Fractals, Random Shapes and Point Fields*. Chichester, Wiley, 1994. 389 p.
43. Straw N.A., Williams D.T., Kulinich O., Gninenko Y.I. Distribution, Impact and Rate of Spread of Emerald Ash Borer *Agilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) in the Moscow Region of Russia. *Forestry*, 2013, vol. 86, iss. 5, pp. 515–522. DOI: [10.1093/forestry/cpt031](https://doi.org/10.1093/forestry/cpt031)
44. *Sustainable Forest Management*. Ed. by J.L. Innes, A.V. Tikina. London, Routledge, 2016. 396 p.
45. Wiegand T., Moloney K.A. Rings, Circles, and Null-Models for Point Pattern Analysis in Ecology. *Oikos*, 2004, vol. 104, iss. 2, pp. 209–229. DOI: [10.1111/j.0030-1299.2004.12497.x](https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.12497.x)
46. Zirlewagen D., Wilpert K. Modeling Water and Ion Fluxes in a Highly Structured, Mixed-Species Stand. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 143, iss. 1-3, pp. 27–37. DOI: [10.1016/S0378-1127\(00\)00522-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00522-3)

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИИ ДРЕВОСТОЕВ И ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНВАЗИВНОГО КОРОЕДА В ПИХТОВЫХ ЛЕСАХ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Н.М. Дебков^{1,2}, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [H-1146-2019](https://orcid.org/0000-0003-3791-0369),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3791-0369>

А. Градель^{3,4}, д-р наук, консультант по лесному делу; ResearcherID: [AAK-1808-2020](https://orcid.org/0000-0002-6298-4151),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6298-4151>

А.А. Алейников⁵, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [K-1285-2017](https://orcid.org/0000-0002-5715-8488),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5715-8488>

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, просп. Академический, д. 10/3, г. Томск, Россия, 634055; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, просп. Ленина, 36, г. Томск, Россия, 634050; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

³Международная консалтинговая компания по лесному делу «Градель», Якобштрассе, д. 12, Герлиц, Германия, 02826; e-mail: agradel@jpberlin.de

⁴Факультет лесного хозяйства и лесной экологии, Гёттингенский университет имени Георга-Августа, Бюзгенвег, д. 5, Гёттинген, Германия, 37077

⁵Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14, Москва, Россия, 117997; e-mail: aaacastor@gmail.com

На сегодняшний день в России самой масштабной и разрушительной инвазией ксилофагов в лесные экосистемы является массовое размножение уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandf.) в пихтовых (*Abies sibirica* Ledeb.) лесах. Цель исследования – изучение пространственной структуры пихтовых лесов и их трансформаций под воздействием уссурийского полиграфа в его вторичном (инвазивном) ареале распространения. Было выбрано 2 модельных пихтарника (около сел Итатка и Малиновка) в Томской области. Оба древостоя представляют собой естественные насаждения на участках, где отмечена лесозаготовительная деятельность, которая была вызвана образованием этих населенных пунктов во второй половине XIX в. Для сбора непространственных и пространственных данных использовали технологию Field-Map. Анализ показал, что высота, диаметр и радиальный прирост ствола пихт, погибших или сильно ослабленных при атаках уссурийского полиграфа, значительно ниже, чем у живых особей. Социальный статус пихт, подвергшихся серьезному нападению или уже погибших от *Polygraphus proximus*, обозначен индексом U_i как умеренно угнетенный. Установлено, что в отличие от живых пихт размещение погибших деревьев было в значительной мере сгруппировано на коротких расстояниях (около 1 м). Данный вывод совпадает с визуальными наблюдениями на других участках, где погибшие деревья были сгруппированы. Тем не менее гипотеза пространственной независимости позиций живых и погибших пихт была принята для обоих участков.

Финансирование: исследование профинансировано Российским фондом фундаментальных исследований и правительством Томской области, грант № 16-44-700782 и выполнено в рамках государственного задания Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (№ АААА-А18-118052400130-7).

Для цитирования: Debkov N.M., Gradel A., Aleinikov A.A. Reconstruction of Stand History and Impact Evaluation of an Invasive Bark Beetle in Siberian Fir Forests with the Help of Spatial Structure Analysis // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 24–41. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-24-41

Ключевые слова: инвазии насекомых, *Polygraphus proximus* Blandf., *Abies sibirica* Ledeb., смертность деревьев, пространственно-временные характеристики.

Поступила 21.07.19 / Received on July 21, 2019

УДК 630*561.24:582.47

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-42-54

LONG-TERM GROWTH TRENDS ANALYSIS OF NORWAY SPRUCE STANDS IN RELATION TO POSSIBLE CLIMATE CHANGE: CASE STUDY OF LENINGRAD REGION

A.S. Alekseev¹, Doctor of Geography, Prof., Head of the Department of Forest Inventory, Management and GIS; ResearcherID: F-6891-2010.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

S.K. Sharma², MS in Forestry, Program Coordinator; ResearcherID: AAD-8788-2019.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-748X>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: a_s_alekseev@mail.ru

²The Resource Nepal, Santinagar, Post Box No. 24609, Kathmandu, Federal Democratic Republic of Nepal; e-mail: sk_victory@hotmail.com

The Lisino training and experimental forest of the Saint-Petersburg State Forest Technical University was chosen as a study area. The forest is located in the central part of the Leningrad region and has a high level of protection as a forest of scientific and historical value. According to the official data, mean annual temperature in the region increased by 0.6 °C within 10 years as well as precipitation. The impact determination of changing climate conditions on Norway spruce trees growth was the aim of this study. Three most representative compartments dominated by Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) were selected for data collection. Core samples were taken by the Pressler increment borer from 107 dominant trees while climatic data were obtained from the nearest weather stations. Tree rings were measured and analyzed using WinDendro software while climate data were processed by Microsoft Excel. Tree ring data cover the time interval from 1848 to 2011, each ring was characterized by width, calendar year, age and diameter of the tree. Radial growth was analyzed within age and diameter classes. Annual rings widths were varied from 0.1 to 6 mm. There was a positive trend in age classes of 0-20, 21-40 and 41-60 years old. The growth was very slow in the age classes of 61-80, 81-100 and >100. Diameters are larger in the age classes of 20-40 and 41-60 as compare to the local diameter growth table which was developed in the 19th century. Diameters for age classes older than 41-60 years were less than prescribed by the diameter growth table. Annual rings width for all age classes also demonstrate cyclic dynamics, moreover, the decline in growth sometimes occurred in recent decades. Multiple regression was used for developing the response function of growth to changes in climatic conditions. There was revealed a high correlation (90 %) and low influence of vegetation period climate data on growth during 1848–2011 (0.08102 mm/°C and 0.00085 mm/mm). Likewise, analysis shows that growth is higher in young and middle-aged than mature and over mature stands. Overall, climate change impact has a positive effect on the radial growth of Norway spruce for the studied area, however, not for all age and diameter classes.

For citation: Alekseev A.S., Sharma S.K. Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-42-54

Keywords: Norway spruce, annual ring width, climate change, age classes, growth trend, temperature, precipitations.

Introduction

Official data shows the reliable temperature growth in the last decades, especially for northernmost areas, for instance in the taiga region. In taiga, temperature is one of the most important ecological factors limiting forest trees' growth and development. Changes in mean and seasonal temperatures in spatial aspects for the Russian Federation are presented in Fig. 1.

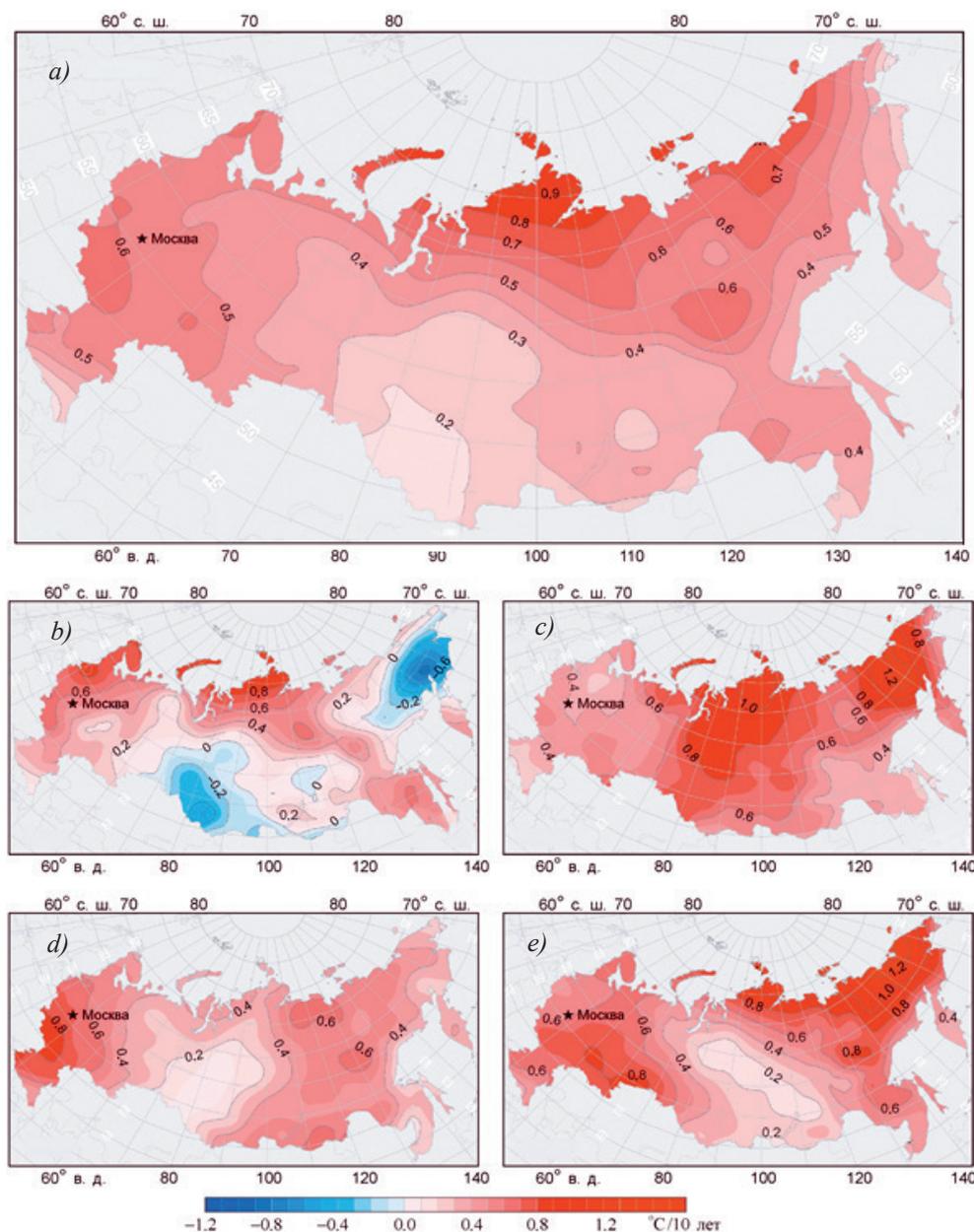
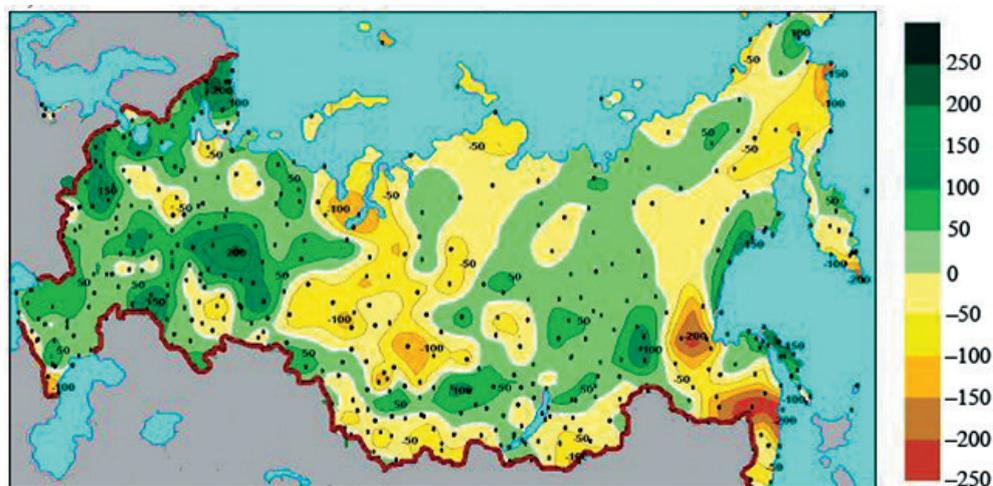


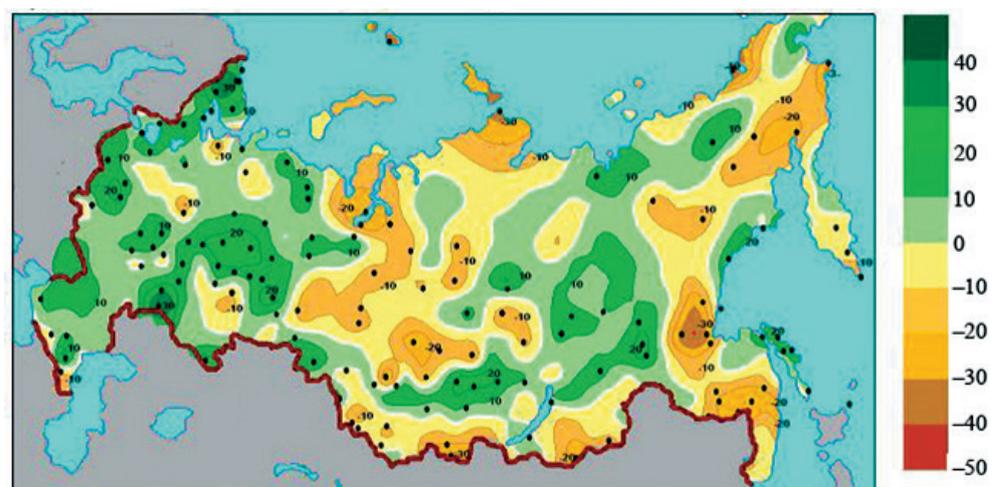
Fig. 1. Spatial pattern of mean temperature variation in Russia: a) – annual; b) – winter; c) – summer; d) – spring; e) – autumn. Adopted from [4]

Leningrad region belongs to the area with an increase in mean annual temperature. Area, where study plots are located, belongs to the territories with temperature

increase by 0.6 °C within 10 years. Changes in annual precipitation over the last 75 years and its deviations for the Russian Federation are presented in Fig. 2. Dots on the maps represent locations of the weather stations.



a



b

Fig. 2. Spatial pattern of annual precipitation changes during 1936–2010 in Russia: *a* – over the last 75 years, mm; *b* – % of the mean value in 1961–1990. Adopted from [4]

In Leningrad Region, there is no or only minimal changes in annual precipitation, measured both in mm and as a percentage of normal precipitation in 75 years.

The estimation of impacts of changing climate conditions on Norway spruce trees growth was the aim of this study. Leningrad region belongs to the areas with an increase of mean annual temperature that is why it is a reason to suppose here elevated growth in radial increment of main tree species as a reaction to climate warming. Increased plant growth in the northern latitudes is an expected outcome of recent climate changes towards warming [19], also such a trend was established for the large areas of European forests [8, 21, 22].

The research area in the narrow sense was Lisino training and experimental forest of the Saint-Petersburg State Forest Technical University. It belongs to

the taiga zone, located out of the influence of damaging factors, has a high-level protection status. This is a forest of high scientific and historical value because it was founded in 1805 and since this time continuously used for research and training. It may be considered as a proper place to boost forest growth registration due to climate warming.

Dendrochronology approach to Norway spruce tree stands radial increment analysis was used as the main method for growth trends revealing. This approach for a long time widely and successfully implemented for the study of climatic impacts on trees growth analysis [3, 5, 10–15, 23, 25], as well as for other environmental factors, which may influence forest growth assessments [16, 17, 20, 24].

Materials and methods

The study area location of the Lisino training and experimental forest of the Saint-Petersburg State Forest Technical University is shown in Fig. 3.



Fig. 3. Location of the study area on the maps of Russia and Leningrad region

The study area is situated on Ladoga-Ilmen lake-glacial lowland (the bottom of lake-glacial basin) from the geomorphologic point of view. The height above sea level varies from 20 up to 70 m. The largest river Lustovka crosses the forest from NW to SE. There are three streams in the forest area: Laguza, Heart and Kastenka. In addition, two channels Kuznetsovskiy and Kozhinskiy pass through the forest. All of these operate as a drainage system for the lowland forested area. The topography is flat and undulating. Small flat hills formed by glacial debris are scattered throughout the forest. Podzol formed in a marsh is the main soil type in Lisino. Other predominant soil types are moor-humus podsolization (20 %),

podzolic moder-mor humus (18 %), marsh soil (57 %), torf-podzolic (2 %) and alluvial soils (3 %). The soil is slightly acidic poor with well-developed podzolic humus horizons.

The climate is characterized as moderate and influenced by cold air masses coming from the Arctic, and the warmer air mass from the Atlantic. The regional climate is strongly influenced by the proximity of the Baltic Sea and Ladoga Lake.

According to the nearest weather station Luban, the maximum temperature in Lisino is 33 °C in July and the minimum is –40 °C in January. The average annual rainfall is approximately 590 mm. Additionally, the average wind speed is 3.3 m/s and average relative humidity is 80 %. The climatic conditions are favorable for the growth and development of trees and shrubs. The length of the growing period is approximately 150–160 days.

Norway spruce is the main species for the Lisino training and experimental forest. It occupies 34.5 % of the total area covered by forest. The second species is Scots pine, which takes 28.1 % of the area covered by forest.

Description of Norway spruce dominated tree stands where wood samples were collected is presented in Table 1.

Table 1

Characteristics of sampled Norway spruce stands

Species composition	Age, yrs	Height, m	Diameter, cm	Growing stock, m ³
<i>Block – 123, compartment – 18, area – 3.1 ha</i>				
Norway spruce, 50 %	130	28	32	470
Norway spruce, 30 %	90	24	24	280
Birch, 20 %	90	23	24	190
Scots pine, single trees	130	–	–	–
Aspen, single trees	90	–	–	–
<i>Block – 200, compartment – 28, area – 2.8 ha</i>				
Norway spruce, 80 %	130	22	24	550
Birch, 20 %	120	24	28	140
Scots pine, single trees	130	–	–	–
<i>Block – 206, compartment – 5, area – 5.9 ha</i>				
Norway spruce, 30 %	170	29	32	570
Norway spruce, 20 %	80	21	24	370
Scots pine, 30 %	170	28	40	560
Birch, 20 %	130	27	30	370
Aspen, single trees	130	–	–	–

As shown in Table 1 sampled Norway spruce dominated tree stands are old-growth of 80–170 years old on average, highly productive and with a mixture of Scots pine, birch, and aspen.

The Pressler increment borer tool was used to extract tree cores in all 3 compartments. One core per tree was collected from 107 sample trees of different ages. The samples were taken at the height of 1.30 m above ground level. The trees were selected in such a way which represented dominant trees (high trees which were

free from disease and malformations) and the most vital trees in different age classes (ocular estimate) from all selected compartments. The oldest tree was 163 years old and the youngest tree was 30 years old in the sample, so annual ring data is available for the period 1848–2011.

The image analysis program WinDendro was applied to detect annual and intra-annual ring boundaries on the base of changes in light intensity of an image and requires manual adjustment to ring boundaries to account for growth anomalies (WinDendro, 2009). The ScannerCal calibration file allows WinDendro to compensate for differences in the dpi reported by the scanner and the real dpi measured with a high precision calibration target. Earlywood and latewood widths, as well as total ring width, were measured automatically for each annual ring sample. If there were almost no contrasts between rings for single-core samples the ring widths were measured manually. In the following analysis total annual ring width was used. Data on temperature and precipitation were collected on local weather stations for each year of the vegetation season of the whole growth period 1848–2011.

For the obtained annual rings data analysis was used before developed special method aimed on removing of age trend from annual ring width data [1, 6, 7].

Each tree ring with the following data was used as a basic unit for the analysis: annual ring width, calendar year of appearance, age of the tree in which the annual ring appears, the diameter of the tree in which the annual ring appears.

Then the annual ring data was grouped firstly by age class for comparison of annual ring width of trees of the same age growing in different calendar years and secondly by age class and diameter for diameter growth curve development for comparison with the data of regional growth and yield tables.

In order to determine the response function of radial increment on climatic factors, temperature and precipitation multiple regression analysis were used. The mean annual radial increment was related to mean temperature and precipitation for vegetation season:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2, \quad (1)$$

where y – mean annual radial increment of Norway spruce trees, mm; a_1 – regression coefficient, which reflects the effect on the radial increment of changes in temperature, mm/°C; x_1 – mean temperature of vegetation season for each year, °C; a_2 – regression coefficient, which reflects the effect on the radial increment of changes in precipitation, mm/mm; x_2 – mean precipitation of vegetation season for each year, mm.

The temperature dependence coefficient of Norway spruce trees for each age class was developed to assess the difference in reaction trees of different age on changes in temperature:

$$y_i = a_i x, \quad (2)$$

where y_i – mean annual radial increment of Norway spruce trees of age class i , considered age classes of 0-20, 21-40, 41-60, 61-80, 81-100, and >100 years old; x – mean temperature of vegetation season for each year, °C.

Regression analysis was done using STATISTICA 10.0 software.

Results and discussion

The long-term trends in Norway spruce radial increment are presented in Fig. 4.

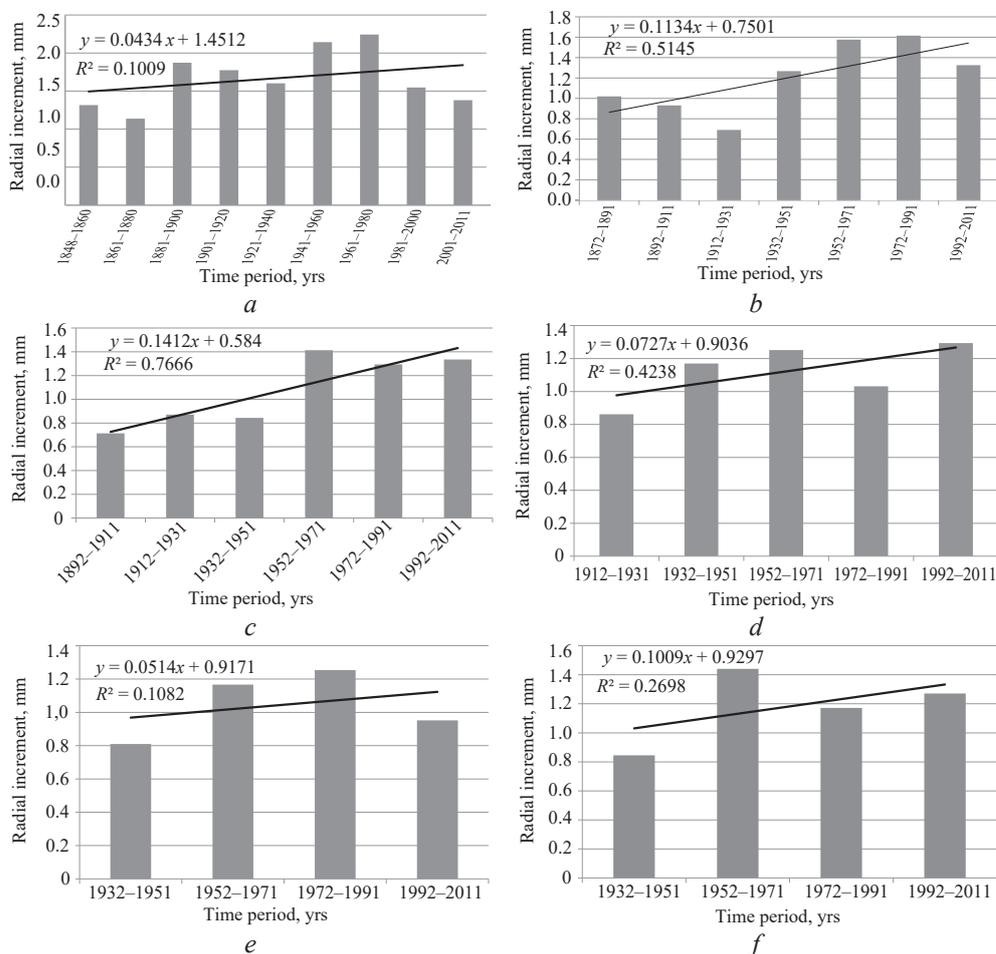


Fig. 4. The long-term trends in Norway spruce radial increment of different age class per 20-years intervals: a) 0-20; b) 21-40; c) 41-60; d) 61-80; e) 81-100; f) >100 years old

Fig. 4 shows the usual pattern between radial increment and age: the greater the age the smaller the increment. Also, as it may be seen from Fig. 4, only for age classes 21-40 and 41-60 there is a statistically reliable trend in the radial increment of Norway spruce trees. For all age classes, including 21-40 and 41-60, increment for the last period is less or almost the same as for some previous ones. For example, for the youngest age class 0-21, the increment for the last period is less than in 6 previous 20-years intervals and the same as in 1848–1860. In addition, the increment dynamics show cyclical changes with a period of approximately 80 years. So, the comparison of Norway spruce radial increment of the same age class growing in different calendar years gives no clear evidence of elevation of increment for the last years as it is supposed to be due to the registered climate warming in the last decades and according to research hypotheses.

Radial increment response function on temperature and precipitation was obtained as a result of two-factor regression analysis. Regression function with

coefficients $a_1 = 0.08102$ mm/°C and $a_2 = 0.00085$ mm of increment/mm of precipitation, which explains mean annual radial increment with determination coefficient of 81.5 %, was developed. Analysis shows practical independence of radial increment on precipitation during vegetation period because coefficient a_2 is very small and weakly dependent on mean temperature of vegetation season. The fact of radial increment independence from precipitation of the vegetation season may be easily explained by the traditional excess of precipitation during evaporation for the studied area, the absence of significant changes in precipitation (see Fig. 2), concave landforms and prevailing of wet soils. The temperature dependence coefficient of Norway spruce radial increment for each age class is presented in Table 2.

Table 2

**Temperature dependence coefficient of Norway spruce trees
radial increment**

Age class, yrs	Coefficient increment – temperature, mm/°C	Determination coefficient, %
0-20	0.123	88
21-40	0.085	90
41-60	0.075	89
61-80	0.074	92
81-100	0.071	86
>100	0.069	96
Mean	0.08283	90

The Norway spruce radial increment of any age class statistically reliable depends on mean vegetation season temperature as it is shown by the data from Table 2, the younger trees the stronger reaction on warming during vegetation season, the coefficient for age class 0-20 years old is approximately as much as twice more than for the age class older than 100 years. The mean temperature dependence coefficient is approximately the same as a_1 and demonstrates also slow mean reaction of increment on temperature changes. If take the temperature growth of 0.6 °C within 10 years for the research area as it officially estimated [4] or 0.06 °C per year the increment reaction will be as much as $0.06 \cdot 0.08102 = 0.0049$ mm and cannot be reliably registered.

Dendrochronological data after special treatment offer a possibility to develop the diameter growth curve for Norway spruce stands and it is of interest to compare the result with diameter growth for the same area but which took place in the previous century. For comparison of diameter growth nowadays and before the local growth and yield tables developed by Vargas de Bedemar in the 19th century for the Lisino training and experimental forest of the Saint-Petersburg State Forest Technical University was taken. The comparison results are presented in Fig. 5. As seen in Fig. 5 only for two age classes of 21-40 and 41-60 years old mean diameter of Norway spruce stands exceeded data of growth and yield tables meanwhile for all others age classes diameter growth is the same or even less. So, the comparison of diameter growth curves derived from radial increment data and growth and yield table of the 19th century doesn't provide clear evidence of Norway spruce stands elevated growth for the last decades.

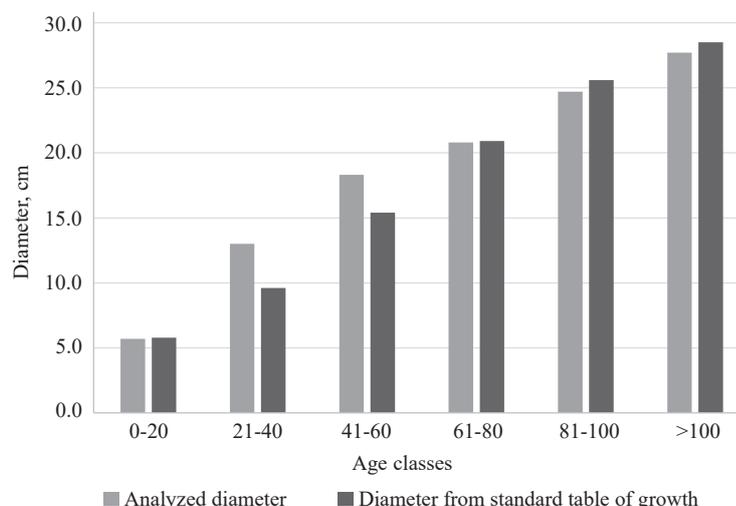


Fig. 5. Mean diameter growth of Norway spruce stands in comparison with the data of regional growth and yield tables

Conclusion

There is a reliable official data on some increase of mean temperature per year as well as for vegetation season for the study area which belongs ecologically and geographically to the south taiga climate zone. It is well known that temperature is one of the main ecological factors limiting the Norway spruce trees growing in the taiga zone. It has shown by the calculated temperature dependence coefficient describing the relationship radial increment/mean temperature for the vegetation season. The increase of mean vegetation season temperature in the last decades should stimulate Norway spruce trees growth but this is not the case of our study. The analysis showed that slowly increased long-term growth of trees of all age classes is statistically reliable only for age classes of 21-60 years old. At the same time for the last 20 years a decline in the radial increment of trees of 0-20, 21-40 and 81-100 years old was revealed; meanwhile, for trees of 41-60, 61-80 and >100 years old radial increment was the same or less than in some previous period. Comparison of experimental and taken from growth and yield table Norway spruce stands diameter growth curves also do not indicate elevated diameter growth for the last decades.

Generally, the absence of elevated growth for the last 20 years and even its decline may be probably explained by growth cycling dynamics with the cycle of approximately 80 years as presented in Fig. 4. During the last decades climate warming does not affect Norway spruce stands growth as it has waited. Two reasons may be considered as explanations of such a fact. First, climate warming is still insignificant yet for the study area and has not led to a definite radial increment increase of Norway spruce trees of all age classes. Second, no clear influence of climate warming on Norway spruce trees growth may be explained by optimality of study area climate conditions. According to Shelford's law of tolerance (Fig. 6) if the temperature belongs to the optimal zone it rising may cause both increase and decline in growth [9].

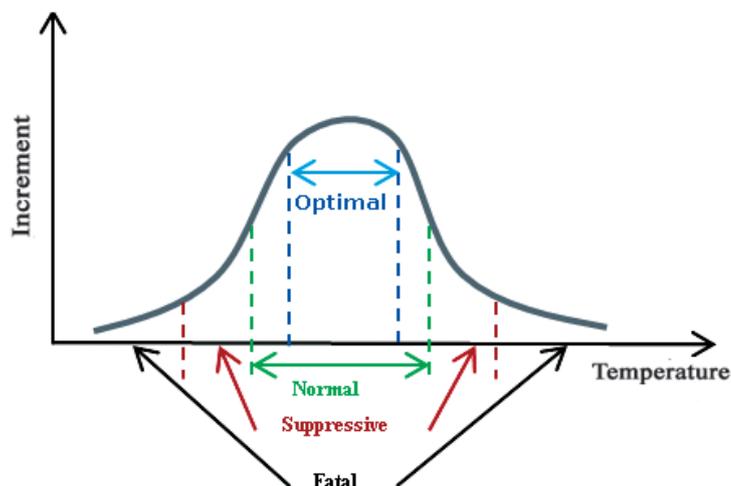


Fig. 6. Shelford's law of tolerance. Horizontal axis includes temperature diapasons as these effects on radial increment (fatal – no increment; suppressive – low increment; normal – satisfactory increment; optimal – maximum increment with both increase and decrease of the increment)

Almost the same results were obtained for the mountainous regions of Northern Italy when the influence of climatic factors on the growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European pine (*Pinus cembra* Pall.) was studied [2]. Similarly, it was found that the radial increment is weakly responsive to changes in climatic factors due to close to the optimal temperature and moisture growth conditions. It is possible to mention here one interesting analysis as a result of which there is no direct influence of temperature on the productivity of plants growing in low or high-temperature environments [18]. The mean productivity of natural vegetation appears to be the same per time unit of the vegetation season in the tropical and near Polar regions despite big temperature differences. The total productivity of plants in these cases is determined by the duration of the growing season if all other environmental factors are at a satisfactory level.

As a general conclusion, we may say that the research on relationships of Norway spruce stands growth and variation of climate conditions should be continued.

REFERENCES

1. Алексеев А.С., Сорока А.Р. Анализ долговременных тенденций роста *Pinus sylvestris* на северо-западе Кольского полуострова // Ботан. журн. 2003. Т. 88, № 6. С. 59–85. [Alekseev A.S., Soroka A.R. Analysis of the Long-Term Trends of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) Growth of the North-Western Kola Peninsula. *Botanicheskii Zhurnal*, 2003, vol. 88, no. 6, pp. 59–85].
2. Ваганов Е.А., Скомаркова М.В., Шульце Э.-Д., Линке П. Влияние климатических факторов на прирост и плотность древесины годовых колец ели и сосны в горах Северной Италии // Лесоведение. 2007. № 2. С. 37–44. [Vaganov E.A., Skomarkova M.V., Schulze E.-D., Linke P. The Influence of Climatic Factors on Wood Increment and Density of Tree Rings in Spruce and Pine in Mountains of Northern Italy. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2007, no. 2, pp. 37–44].

3. Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. 232 с. [Vaganov E.A., Shashkin A.V. *Coniferous Species Tree Rings Growth and Structure*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 232 p.]
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет, 2014. 94 с. [*Second Assessment Report of Federal Service of Hydrometeorology and Environmental Monitoring about Climate Changes and Their Consequences on Territory of Russian Federation. Technical Resume*. Moscow, Rosgidromet Publ., 2014. 94 p.]
5. Abrams M.D., van de Gevel S., Dodson R.C., Copenheaver C.A. The Dendroecology and Climatic Impacts for Old-Growth White Pine and Hemlock on the Extreme Slopes of the Berkshire Hills, Massachusetts, USA. *Canadian Journal of Botany*, 2000, vol. 78, no. 7, pp. 851–861. DOI: [10.1139/b00-057](https://doi.org/10.1139/b00-057)
6. Alekseev A.S., Sharma Kumar S. Norway Spruce Trees Long-Term Growth with Account for Possible Climate Change in the Leningrad Region of Russian Federation. *IUFRO 125th Anniversary Congress, 18–22 September 2017, Freiburg, Germany*. Freiburg, IUFRO, 2017, art. IUFRO17-457.
7. Alekseev A.S., Soroka A.R. Scots Pine Growth Trends in Northwestern Kola Peninsula as an Indicator of Positive Changes in the Carbon Cycle. *Climatic Change*, 2002, vol. 55, iss. 1-2, pp. 183–196. DOI: [10.1023/A:1020271629819](https://doi.org/10.1023/A:1020271629819)
8. Badeau V., Becker M., Bert D., Dupouey J.L., Lebourgeois F., Picard J.-F. Long-Term Growth Trends of Trees: Ten Years of Dendrochronological Studies in France. *Growth Trends in European Forests*. Ed. by H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard. Berlin, Springer, 1996, pp. 167–181. DOI: [10.1007/978-3-642-61178-0_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_14)
9. Begon M., Townsend C.R., Harper J.L. *Ecology: From Individuals to Ecosystems*. Oxford, UK, Wiley-Blackwell, 2005. 750 p.
10. Chen P.-Y., Welsh C., Hamann A. Geographic Variation in Growth Response of Douglas-Fir to Interannual Climate Variability and Projected Climate Change. *Global Change Biology*, 2010, vol. 16, iss. 12, pp. 3374–3385. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2010.02166.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02166.x)
11. Chhin S. Influence of Climate on the Growth of Hybrid Poplar in Michigan. *Forests*, 2010, vol. 1, iss. 4, pp. 209–229. DOI: [10.3390/f1040209](https://doi.org/10.3390/f1040209)
12. Chhin S., Chumack K., Dahl T., David E.T., Kurzeja P., Magruder M., Telewski F.W. Growth-Climate Relationships of *Pinus strobus* in the Floodway versus Terrace Forest along the Banks of the Red Cedar River, Michigan. *Tree-Ring Research*, 2013, vol. 69, iss. 2, pp. 37–47. DOI: [10.3959/1536-1098-69.2.37](https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.2.37)
13. Chhin S., Zalesny Jr. R.S., Parker W.C., Brissette J. Dendroclimatic Analysis of White Pine (*Pinus strobus* L.) Using Long-Term Provenance Test Sites across Eastern North America. *Forest Ecosystems*, 2018, vol. 5, art. 18. DOI: [10.1186/s40663-018-0136-0](https://doi.org/10.1186/s40663-018-0136-0)
14. Fritts H.C. *Tree Rings and Climate*. London, Academic Press, 1976. 567 p.
15. Jiao L., Jiang Y., Wang M., Zhang W., Zhang Y. Age-Effect Radial Growth Responses of *Picea schrenkiana* to Climate Change in the Eastern Tianshan Mountains, Northwest China. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 9, art. 294. DOI: [10.3390/f8090294](https://doi.org/10.3390/f8090294)
16. Juknys R., Stravinskiene V., Vencloviene J. Tree-Ring Analysis for the Assessment of Anthropogenic Changes and Trends. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, vol. 77, pp. 81–97. DOI: [10.1023/a:1015718519559](https://doi.org/10.1023/a:1015718519559)
17. Juknys R., Vencloviene J., Stravinskiene V., Augustaitis A., Bartkevicius E. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth and Condition in a Polluted Environment: From Decline to Recovery. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 125, iss. 2, pp. 205–212. DOI: [10.1016/S0269-7491\(03\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00070-8)
18. Körner C. Significance of Temperature in Plant Life. *Plant Growth and Climate Change*. Ed. by J.I.L. Morison, M.D. Morecroft. UK, Blackwell Publishing, 2006, pp. 48–70. DOI: [10.1002/9780470988695.ch3](https://doi.org/10.1002/9780470988695.ch3)

19. Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R. Increased Plant Growth in the Northern High Latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, vol. 386, pp. 698–702. DOI: [10.1038/386698a0](https://doi.org/10.1038/386698a0)

20. Rodríguez-Catón M., Villalba R., Srur A.M., Luckman B. Long-Term Trends in Radial Growth Associated with *Nothofagus pumilio* Forest Decline in Patagonia: Integrating Local- into Regional-Scale Patterns. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 339, pp. 44–56. DOI: [10.1016/j.foreco.2014.12.004](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.004)

21. Schadauel K. Growth Trends in Austria. *Growth Trends in European Forests*. Ed. by H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard. Berlin, Springer, 1996, pp. 275–289. DOI: [10.1007/978-3-642-61178-0_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_20)

22. Schneider O., Hartmann F. Growth Trends of Trees. Regional Study on Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Swiss Jura. *Growth Trends in European Forests*. Ed. by H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard. Berlin, Springer, 1996, pp. 183–198. DOI: [10.1007/978-3-642-61178-0_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_15)

23. Stravinskienė V. *Dendrochronological Indication of Climatic Factors and Anthropogenic Environmental Trends in Lithuania*. Dr. Habilitation Dissertation. Kaunas, Lithuania, Vytautas Magnus University, 2002. 175 p.

24. Stravinskienė V., Bartkevičius E., Plaušinytė E. Impact of Industrial Pollution on Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Radial Growth in the Areas of Mineral Fertilizer Factory “Achema”. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, iss. 6, pp. 525–531. DOI: [10.1134/S1067413614060137](https://doi.org/10.1134/S1067413614060137)

25. Wang H., Shao X.-M., Jiang Y., Fang X.-Q., Wu S.-H. The Impacts of Climate Change on the Radial Growth of *Pinus koraiensis* along Elevations of Changbai Mountain in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 289, pp. 333–340. DOI: [10.1016/j.foreco.2012.10.023](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.023)

АНАЛИЗ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

А.С. Алексеев¹, д-р геогр. наук, проф., зав. каф. лесной таксации, лесоустройства и ГИС; ResearcherID: [F-6891-2010](https://orcid.org/0000-0001-8795-2888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

Ш.К. Шарма², магистр лесного дела, координатор программы; ResearcherID: [AAD-8788-2019](https://orcid.org/0000-0003-4952-748X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-748X>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: a_s_alekseev@mail.ru

²Ресурсы Непала, Сангинагар, а/я 24609, Катманду, Федеративная Демократическая Республика Непал; e-mail: sk_victory@hotmail.com

Долговременные тенденции роста древостоев ели европейской изучались на территории Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области, расположенной в ее центре и имеющей высокий защитный статус ценных лесов, имеющих научное и историческое значение. По официальным данным среднегодовая температура в районе исследований возросла на 0,6 °С за 10 лет, среднегодовые осадки также увеличились незначительно. Цель исследований – определение влияния произошедших изменений климатических показателей на рост деревьев ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.). Три наиболее типичных выдела с преобладанием ели европейской были выбраны для сбора данных о ходе роста древостоев. Образцы древесины отобраны буровом Пресслера у 107 деревьев, метеорологические данные получены по наблюдениям ближайшей метеорологической станции. Радиальный прирост измерен с помощью

калиброванного сканера и специализированной программы WinDendro, полученные результаты совместно с метеорологическими данными обработаны в программе Excel. Данные о радиальном приросте модельных деревьев покрывают интервал с 1848 по 2011 г., каждый годичный слой характеризовался календарным годом образования, шириной, возрастом и диаметром дерева. Радиальный прирост деревьев анализировался по классам возраста и ступеням толщины. Ширина годичных колец варьировала от 0,1 до 6 мм. Выявлены положительные тренды радиального прироста для классов возраста 0-20, 21-40 и 41-60 лет. Для классов возраста 61-80, 81-100 и более 100 лет положительные изменения радиального прироста оказались недостоверны. Анализ хода роста деревьев по диаметру путем сравнения с местными таблицами хода роста показал больший диаметр для классов возраста 21-40 и 41-60 лет, для остальных классов возраста он оказался меньше указанного в таблицах. Радиальный прирост для всех классов возраста продемонстрировал наличие циклической динамики изменений, причем падение прироста иногда приходилось на последние десятилетия. Для построения функции отклика прироста на изменение климатических условий был использован множественный регрессионный анализ. С высокой степенью достоверности (90 %) установлено слабое влияние температуры и количества осадков за вегетационный сезон на радиальный прирост деревьев с 1848 по 2011 г. (0,08102 мм/°C и 0,00085 мм/мм). Кроме того, анализ показал более сильную реакцию радиального прироста на изменения климатических условий у молодых и средневозрастных древостоев по сравнению со спелыми и перестойными. В целом изменения климатических условий имеют положительное влияние на радиальный прирост, но не для всех классов возраста и ступеней толщины. *Для цитирования:* Alekseev A.S., Sharma S.K. Long-Term Growth Trends Analysis of Norway Spruce Stands in Relation to Possible Climate Change: Case Study of Leningrad Region // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 42–54. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-42-54

Ключевые слова: ель европейская, ширина годичных колец, изменение климата, класс возраста, тренд радиального прироста, температура, осадки.

Поступила 06.12.19 / Received on December 6, 2019

УДК 634*54:630*228

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-55-71

РАЗНООБРАЗИЕ ОРЕХОВ ЛЕЩИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*Corylus avellana* L.) И ПРОГНОЗ ВСТРЕЧАЕМОСТИ ЕЕ ФОРМ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ КАВКАЗЕ

С.Г. Биганова¹, 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. Сухоруких¹, д-р с.-х. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>

К.Н. Кулик², 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. Кулик², канд. с.-х. наук; ResearcherID: [W-4034-2018](https://orcid.org/0000-0001-5927-7336),

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

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

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

К наиболее актуальным вопросам при изучении биологии и селекции лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) относятся оценка разнообразия (полиморфизма) ее плодов и прогноз встречаемости форм с хозяйственно-ценными признаками в естественных популяциях, являющихся источником ценнейшего генофонда вида. Цель исследования – выявление разнообразия орехов лещины и прогноз встречаемости ее форм в естественных дубовых и пихтовых формациях Северо-Западного Кавказа. Для анализа отобрано рендомизированно по 1 ореху с растения в дубовой (297 шт.) и пихтовой (301 шт.) формациях. Изучали основные хозяйственно-ценные показатели орехов лещины: массу и выход ядра, массу ореха, общий балл качества плодов, крепость и цвет скорлупы, вкус, неразрушаемость и наличие шелухи на ядре. Достоверность различий энтропии, ее дисперсию и степень свободы, разнообразие по индексу Шеннона, коэффициенты вариации, Пирсона и Чупрова, значение по χ^2 определяли известными методами. Индекс распределенного рангового разнообразия (*IRRR*) вычисляли из соотношения суммы произведений относительной энтропии признака на его ранг к числу градаций признака, индекс распределенного рангового разнообразия с учетом доли (*IRRRD*) для отдельного признака – как произведение *IRRR* на долю признака соответствующей градации. Прогноз наличия форм лещины выполнен в соответствии с законом параллелизма. Установлено, что в дубовой и пихтовой формациях у лещины имеются орехи со сходными признаками. Выводы о большем разнообразии показателей плодов лещины, произрастающей в составе дубовой формации, по сравнению с пихтовой полностью совпали по индексам Шеннона, *IRRR*, *IRRRD* и χ^2 . Встречаемость наиболее ценных в хозяйственном отношении форм в формациях прогнозируется с различной частотой.

Для цитирования: 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. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-55-71

Ключевые слова: лещина обыкновенная, орехи, хозяйственно-ценные показатели, разнообразие, индекс Шеннона, коэффициент вариации, индекс распределенного рангово-

го разнообразия, индекс распределенного рангового разнообразия с учетом доли, разнообразие форм, прогноз встречаемости.

Введение

Представители рода *Corylus* L. являются ценными орехоплодными растениями [22, 35, 38], культивируются во многих странах мира на плантациях и в личных хозяйствах [1, 4, 8, 9, 13, 25], широко представлены в других естественных и искусственных насаждениях [11, 17, 21, 37].

Лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) имеет высокую ценность. Это обусловлено многими факторами, ведущим из которых является наличие пищевых качеств ядра [9, 13, 19, 26, 27, 30]. Оно используется как человеком, так и представителями дикой фауны. Кроме плодов, у этого вида практически все его части имеют хозяйственное значение: пыльца – ценный корм для пчел и других насекомых, листья, кора, корни используются для приготовления лекарств [17, 29]. Растение хорошо выполняет почвозащитную и почвоулучшающую роль [21].

Культурные сорта лещины называются фундуком. Потребность в ее плодах постоянно возрастает, во многих странах проводятся исследования по изучению биологии, селекции и особенностей культивирования вида [12, 13, 26, 32, 33, 38, 39].

Наиболее актуальные вопросы – оценка разнообразия (полиморфизма) плодов и прогноз встречаемости форм с хозяйственно-ценными значимыми признаками в естественных популяциях, являющихся источником ценнейшего генофонда вида [11, 20, 23, 27, 28, 34, 36].

В условиях Северо-Западного Кавказа значительный интерес при изучении разнообразия лещины в природной популяции вызывают дубовые формации, где формируются благоприятные условия для нее, и пихтовые, где вид имеет верхнюю границу своего распространения [17, 23].

В биологических исследованиях для оценки разнообразия довольно часто используют индекс Шеннона, коэффициенты вариации, сопряженности Чупрова и Спирмена, значения χ^2 [2, 6, 18]. Особенности могут быть оценены по среднему значению признака, как показателю, указывающему на увеличение или уменьшение его величины [7, 18]. Имеются указания, что для каждого из них есть ограничения, но в целом идеальные показатели отсутствуют [2, 7, 18]. Обычно исследователи сами выбирают, какие из них считаются наиболее приемлемыми для данного эксперимента [2].

Для оценки разнообразия (полиморфизма) также предложено применять соответствующие индексы [3, 16]. Этот метод базируется на определении относительной энтропии и позволяет оценивать разнообразие количественных и качественных признаков как отдельно, так и в сочетании с произвольным их разбиением на классы и градации с учетом значимости.

Внутривидовой полиморфизм обуславливает особенности развития и использования отдельных форм растений [8, 22]. Прогноз их наличия у вида позволяет существенно ускорить селекционный процесс и повысить его эффективность [5, 15]. Для условий Северо-Западного Кавказа данные вопросы недостаточно изучены и требуют разрешения.

Цель данного исследования – выявление разнообразия орехов лещины и прогноз встречаемости ее форм в лесных формациях Северо-Западного Кавказа.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в естественных дубовых (*Quercus robur* L., *Q. petraea* Uebl., *Q. Hartwissiana* Stev.) и пихтовых (*Abies Nordmanniana* Spach.) формациях Северо-Западного Кавказа. Для оценки разнообразия плодов лещины отобрано рендомизированно по 1 ореху с растения в дубовой формации на высоте 250...600 м над у. м. (всего 297 шт.) и пихтовой формации на высоте 1100...1400 м над у. м. (301 шт.). Оценку количественных (масса и выход ядра, масса ореха, общий балл качества плодов) и качественных (крепость и цвет скорлупы, вкус, неразрушаемость и наличие шелухи на ядре) хозяйственно-ценных показателей орехов лещины осуществляли по методикам [4, 17]. Селекционные категории устанавливали по Ф.Л. Щепотьеву и др. [24]. Для массы ядра, определенной из произведения массы плода на долю выхода ядра соответствующих селекционных категорий, установлены следующие градации: 1,52 г и более – очень крупные; 1,16...1,51 г – крупные; 0,85...1,15 г – средние; 0,58...0,84 г – мелкие; 0,57 г и менее – очень мелкие ядра. К лучшим относили формы, имеющие качество плодов 43 балла и более [4, 17].

Индекс Шеннона вычисляли по [2].

Достоверность различий в значениях энтропии, ее дисперсию и степени свободы оценивали по методу, предложенному К. Хатчесоном [31]:

$$t = \frac{E_1 - E_2}{\sqrt{\text{var } E_1 + \text{var } E_2}},$$

где E_1 и E_2 – сравниваемые значения энтропии; $\text{var } E_1$ и $\text{var } E_2$ – дисперсии энтропии,

$$\text{Var } E = \frac{\sum_{i=1}^n p_i (\log_2 p_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \right)^2}{N} + \frac{S-1}{2N^2};$$

p_i – доля признака; S – число градаций признака; N – число особей в выборке.

Для сравнения значений энтропии степень свободы устанавливали, используя следующую модель:

$$df = \frac{(\text{var } E_1 + \text{var } E_2)^2}{\frac{(\text{var } E_1)^2}{N_1} + \frac{(\text{var } E_2)^2}{N_2}},$$

где N_1 и N_2 – численность сравниваемых выборок.

Оценку разнообразия (полиморфизма) с учетом значимости градаций признаков осуществляли по индексу распределенного рангового разнообразия [3] (IRRR):

для отдельного признака

$$IRRR = \frac{\sum_{i=1}^n E r_i}{n};$$

по всем признакам для формации

$$IRRR = \frac{\sum_{j=1}^m IRRR_j}{m},$$

где E – относительная энтропия показателя; r_i – ранг градации показателя; n – число составляющих градаций; $IRRR_j$ – индекс распределенного рангового разнообразия отдельного признака; m – число признаков.

Учитывая разную долю отдельных градаций признака, их оценивали по индексу распределенного рангового разнообразия с учетом доли ($IRRRD$), который предложен для повышения чувствительности оценки разнообразия:

$$IRRRD = IRRR p_i,$$

где p_i – доля признака.

При оценке всех признаков формула принимает следующий вид:

$$IRRRD = \frac{\sum_{j=1}^m IRRRD_j}{m},$$

где $IRRRD_j$ – индекс распределенного рангового разнообразия с учетом доли для отдельного признака.

Различие индексов разнообразия считается существенным при отличии в 10 % и более [3, 16]:

$$d = \frac{I_1 - I_2}{I_1} 100 \% \geq 10 \%,$$

где d – разность индексов разнообразия, %; I_1 – больший индекс разнообразия; I_2 – меньший индекс разнообразия.

Величина ранга градации устанавливалась равной соответствующему коэффициенту значимости, используемому для оценки хозяйственно-ценных признаков лещины [17]. Прогноз о наличии формового разнообразия выполняли на основе закона параллелизма [15].

Данные обрабатывали с применением программ Stadia-8.0, Microsoft Excel и известных методов [6, 7, 18].

Результаты исследования и их обсуждение

Формация дуба была представлена насаждениями с его участием 0,4–0,8 ед.; формация пихты – при ее участии 0,6–0,8 ед. В дубовой формации лещина произрастала на всей площади с небольшим преимуществом (до 15...20 %) по опушкам, в пихтовой – по опушкам и от них вглубь насаждения до 20...30 м.

Значения индексов Шеннона, средние величины балльной оценки, коэффициент вариации изучаемых показателей для различных условий представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения индексов Шеннона, средней балльной оценки и коэффициентов вариации показателей качества орехов лещины в дубовой / пихтовой формациях

Показатель	Индекс Шеннона	Средняя балльная оценка, балл	Коэффициент вариации
Цвет скорлупы	1,54 / 1,66	0,70 ± 0,015 / 0,72 ± 0,016	35,98 ± 1,48 / 39,21 ± 1,60
Масса ореха	1,40 / 0,90	0,48 ± 0,012 / 0,39 ± 0,010	42,24 ± 1,73 / 44,61 ± 1,82
Крепость скорлупы	1,54 / 1,35	2,98 ± 0,041 / 3,01 ± 0,036	23,94 ± 0,98 / 20,86 ± 0,85
Наличие шелухи на ядре	1,78 / 1,38	1,47 ± 0,057 / 1,02 ± 0,046	67,57 ± 2,77 / 78,40 ± 3,2
Неразрушаемость ядра	0,80 / 0,32	9,23 ± 0,109 / 9,72 ± 0,072	20,39 ± 0,84 / 12,77 ± 0,52
Масса ядра	1,35 / 0,74	3,62 ± 0,078 / 2,98 ± 0,048	37,06 ± 1,52 / 27,98 ± 1,44
Вкус ядра	1,84 / 1,72	11,78 ± 0,162 / 11,91 ± 0,144	23,71 ± 0,97 / 21,01 ± 0,81
Выход ядра	1,80 / 1,27	3,13 ± 0,114 / 2,15 ± 0,092	62,55 ± 2,57 / 74,36 ± 3,03
Общий балл	1,15 / 1,15	36,01 ± 0,287 / 34,06 ± 0,233	13,74 ± 0,56 / 11,89 ± 0,48

Цвет скорлупы. В обеих формациях присутствуют плоды всех оттенков – от темных до светлых. Разнообразие признака по индексу Шеннона в пихтовой и дубовой формациях достоверно не отличается при $\alpha = 0,05$ ($t_{\text{факт}} = 1,57$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Отличие в балльной оценке цвета орехов в формациях составило 0,02 балла и несущественно ($t_{\text{факт}} = 0,62$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Оценка влияния условий произрастания по значениям χ^2 не выявила достоверной связи между распределением плодов по цвету в формациях ($\chi^2_{\text{факт}} = 2,85$; $\chi^2_{\text{ст}} = 7,82$). Сопряженность факторов не подтверждена значениями коэффициентов Пирсона (0,07) и Чупрова (0,05). Коэффициенты вариации отличаются на 3,23 %, но отличие незначимо при $\alpha = 0,05$ ($t_{\text{факт}} = 1,48$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Распределение орехов лещины по градациям, значения $IRRR$ и $IRRRD$ в дубовой и пихтовой формациях представлены в табл. 2.

Таблица 2

Распределение орехов лещины по цвету скорлупы, значения $IRRR$, $IRRRD$ в дубовой / пихтовой формациях

Цвет скорлупы, градация	Доля	Ранг градации	$IRRR$	$IRRRD$
Темные, землистые	0,07 / 0,08	0,22	0,169 / 0,182	0,010 / 0,01
Темные, матовые	0,52 / 0,48	0,56	0,431 / 0,464	0,220 / 0,23
Средней интенсивности, слегка блестящие	0,35 / 0,34	0,89	0,685 / 0,738	0,240 / 0,25
Светлые блестящие	0,06 / 0,10	1,33	1,024 / 1,103	0,060 / 0,11
<i>Среднее</i>	–	–	0,577 / 0,622	0,130 / 0,15

Согласно данным табл. 2, индекс $IRRR$ в формациях отличается на 7,23 %, что не превышает критическое значение. Индекс разнообразия с учетом доли ($IRRRD$) равен 9,40 % < 10 %, что указывает на отсутствие различия орехов по цвету в формациях при детальном изучении отдельных градаций признака. Однако наиболее ценных в селекционном отношении орехов со светлой блестящей скорлупой, собранных преимущественно на более открытых участках, в пихтовой формации на 40 % больше, чем в дубовой.

Масса ореха. В изучаемых условиях выявлены плоды от очень мелких до крупных. Очень крупные плоды в выборке отсутствовали. Все методы, за исключением оценки по значению коэффициента вариации (отличие в 2,37 % несущественно ($t_{\text{факт}} = 0,94$; $t_{\text{ст}} = 1,96$), указали на отличие признака в изучаемых формациях. По значению индекса Шеннона оно достоверно и составило 0,50 ($t_{\text{факт}} = 5,03$; $t_{\text{ст}} = 1,96$), по значениям χ^2 ($\chi^2_{\text{факт}} = 27,98$; $\chi^2_{\text{ст}} = 7,82$), коэффициенту Пирсона – 0,211, Чупрова – 0,164, средней массе плода в дубовой формации – 1,41 г, пихтовой – 1,19 г ($t_{\text{факт}} = 6,33$; $t_{\text{ст}} = 1,96$), среднему баллу 0,09 ($t_{\text{факт}} = 6,29$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Соотношение долей по массе ореха и значению индексов разнообразия отражено в табл. 3.

Таблица 3

Распределение орехов лещины по массе, значения индексов разнообразия в дубовой/пихтовой формациях

Масса ореха, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Очень мелкие	0,61 / 0,81	0,37	0,259 / 0,167	0,160 / 0,136
Мелкие	0,26 / 0,13	0,53	0,369 / 0,238	0,094 / 0,031
Средние	0,10 / 0,05	0,73	0,511 / 0,330	0,050 / 0,014
Крупные	0,03 / 0,01	0,93	0,653 / 0,421	0,018 / 0,006
<i>Среднее</i>	–	–	0,448 / 0,289	0,081 / 0,047

Как следует из данных табл. 3, в обеих формациях преобладают очень мелкие плоды, в дубовой их 61 %, пихтовой – 81 %.

Средние значения индексов разнообразия отличаются в пределах 0,03–0,16 (35,49...41,98 %) и превышают критическое значение 10 %. Из этого следует, что разнообразие плодов по массе выше в дубовой формации.

Крепость скорлупы. При оценке разнообразия данного показателя по индексу Шеннона (см. табл. 1) отличие в 0,19 ед. существенно ($t_{\text{факт}} = 2,36$; $t_{\text{ст}} = 1,96$), индексы разнообразия во всех случаях превышают критическое значение 10 % и изменяются от 11,35 до 12,04 % (табл. 4). Коэффициент вариации в дубовой формации (см. табл. 1) выше на 3,08 % ($t_{\text{факт}} = 2,37$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Однако средние значения признака в балльном выражении не отличаются: в дубовой формации – $2,98 \pm 0,041$, в пихтовой – $3,01 \pm 0,036$ ($t_{\text{факт}} = 0,43$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). По крепости преобладают плоды, раскалываемые со средним усилием. Их доля в дубовой формации составила 54 %, в пихтовой – 65 % (табл. 4).

Таблица 4

Распределение орехов лещины по крепости скорлупы, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Крепость скорлупы, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Раскалывается при большом усилии	0,02 / 0,01	1	0,770 / 0,677	0,013 / 0,009
Раскалывается с трудом	0,21 / 0,15	2	1,540 / 1,354	0,327 / 0,207
Раскалывается со средним усилием	0,54 / 0,65	3	2,309 / 2,031	1,252 / 1,316
Раскалывается легко	0,23 / 0,19	4	3,079 / 2,708	0,705 / 0,504
<i>Среднее</i>	–	–	1,924 / 1,693	0,574 / 0,509

В выборке присутствуют поля с численностью менее 5 случаев, поэтому оценка по критерию χ^2 , коэффициентам Пирсона и Чупрова согласно ограничениям [18] не производилась.

Неразрушаемость ядра. В выборке из пихтовой формации средний оценочный балл признака составил $9,72 \pm 0,072$, в дубовой несколько меньше – $9,23 \pm 0,109$ балла (см. табл. 1). Разница в 0,49 балла существенна ($t_{\text{факт}} = 3,74$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Оценка по другим методам указала на увеличение разнообразия плодов лещины в дубовой формации. Так, различие по индексу Шеннона составило 0,41 и достоверно ($t_{\text{факт}} = 4,96$; $t_{\text{ст}} = 1,96$), по коэффициенту вариации – 7,62 % ($t_{\text{факт}} = 7,71$; $t_{\text{ст}} = 1,96$).

Таблица 5

Распределение орехов лещины по неразрушаемости ядра, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Неразрушаемость ядра, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Ядро сильно повреждено	0,003 / 0	1	0,403 / 0,157	0,001 / $2 \cdot 10^{-7}$
Ядро с отколовшимися кусками средней величины	0,091 / 0,043	4	1,610 / 0,628	0,146 / 0,027
Ядро с отколовшимися небольшими кусочками	0,064 / 0,007	7	2,818 / 1,099	0,180 / 0,007
Ядро цельное	0,842 / 0,950	10	4,025 / 1,570	3,388 / 1,491
<i>Среднее</i>	–	–	2,214 / 0,863	0,929 / 0,381

Согласно данным табл. 5, в обеих формациях у плодов лещины ядра хорошо (в 84...95 % случаях) сохраняются при раскалывании орехов. По индексам *IRRR*, *IRRRD* отмечена существенность различий в разнообразии плодов в 58,99...61,02 %, что больше 10 %. При наличии ограничений для метода [18] сравнение данных по значениям χ^2 не выполнялось.

Масса ядра. В дубовой формации, расположенной в более теплой зоне, признак имеет большее на 0,16 г значение ($t_{\text{факт}} = 9,51$; $t_{\text{ст}} = 1,96$) по сравнению с пихтовой. Отличие в 0,16 г существенно. В балльном выражении (см. табл. 1) тенденция сохраняется и различие в 0,64 существенно ($t_{\text{факт}} = 6,98$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Разнообразие массы ядер, оцененное по индексу Шеннона (см. табл. 1), указало на ее большее значение в дубовой формации на 0,61 по сравнению с пихтовой ($t_{\text{факт}} = 6,57$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Различие по χ^2 достоверно ($\chi^2_{\text{факт}} = 55,34$, $\chi^2_{\text{ст}} = 7,82$). Коэффициенты Пирсона (0,29) и Чупрова (0,23) указывают на наличие небольшой по силе связи массы ядра с условиями, складывающимися в разных формациях. Разность коэффициентов вариации в 9,08 % предполагает большее разнообразие признака в насаждениях дуба ($t_{\text{факт}} = 4,78$; $t_{\text{ст}} = 1,96$).

По данным табл. 6, индексы разнообразия изменяются в диапазоне 45,23...49,91 % и более, что больше теоретического значения 10 %. Это свидетельствует о большом разнообразии массы ядер в дубовой формации. Анализ долей указывает, что в пихтовой формации преобладают очень мелкие ядра (85 %), в дубовой их 57 %, а доля мелких – крупных в первом случае составляет 15 %, во втором – 43 %. Тенденция к снижению массы питательной части орехов лещины с продвижением в районы с более низкими температурами отмечена и в других регионах [10, 13].

Таблица 6

Распределение орехов лещины по массе ядра, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Масса ядра, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Очень мелкие	0,572 / 0,847	2,87	1,940 / 1,062	1,110 / 0,900
Мелкие	0,340 / 0,126	3,34	2,259 / 1,237	0,768 / 0,156
Средние	0,074 / 0,020	5,65	3,817 / 2,090	0,283 / 0,042
Крупные	0,013 / 0,007	8,29	5,606 / 3,070	0,075 / 0,020
<i>Среднее</i>	–	–	3,405 / 1,865	0,559 / 0,280

Наличие шелухи на ядре. В балльном выражении более качественные плоды сосредоточены в насаждениях дуба ($1,47 \pm 0,057$ балла) по сравнению с участками пихты ($1,02 \pm 0,046$ балла) (табл. 7). Отличие в 0,45 балла существенно на уровне 95 % ($t_{\text{факт}} = 6,04$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Данная тенденция подтверждается оценкой по значениям χ^2 ($\chi^2_{\text{факт}} = 84,53$; $\chi^2_{\text{ст}} = 7,82$). Влияние этого фактора на показатель близко к средней по силе связи, коэффициент Пирсона составляет 0,35, Чупрова – 0,29. По значению коэффициента вариации (см. табл. 1) разнообразие в пихтовой формации выше на 10,83 % ($t_{\text{факт}} = 2,56$; $t_{\text{ст}} = 1,96$).

Таблица 7

Распределение орехов лещины по наличию шелухи на ядре, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Наличие шелухи на ядре, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Ядро сильно покрыто шелухой	0,094 / 0,030	0,22	0,196 / 0,151	0,018 / 0,005
Ядро средне покрыто шелухой	0,256 / 0,625	0,56	0,498 / 0,385	0,128 / 0,240
Ядро слабо покрыто шелухой	0,471 / 0,266	1,50	1,335 / 1,031	0,629 / 0,274
Ядро без шелухи	0,178 / 0,080	3,33	2,963 / 2,289	0,529 / 0,182
<i>Среднее</i>	–	–	1,248 / 0,964	0,326 / 0,175

По индексу Шеннона разнообразие выше в дубовой формации (см. табл. 1). Различие составило 0,41 и достоверно ($t_{\text{факт}} = 5,23$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Это согласовывается и со значениями индексов разнообразия (табл. 7.), где отличия изменяются в пределах 22,76...46,32 %, что превышает теоретическое значение 10 %. Таким образом, в дубовой формации данный признак более разнообразен. Кроме того, он имеет лучшее качество: 65 % ядер, слабо покрытых и без шелухи по сравнению с 35 % в пихтовой формации.

Вкус ядра. Оценочный балл вкуса ядра лещины имел близкие значения у особей, произрастающих в разных формациях: в дубовой – $11,78 \pm 0,162$ балла, в пихтовой – $11,91 \pm 0,144$ балла (см. табл. 1). Отличие в 0,13 балла несущественно ($t_{\text{факт}} = 0,61$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Оценка сопряженности факторов также указала на отсутствие достоверной связи ($\chi^2_{\text{факт}} = 8,27$; $\chi^2_{\text{ст}} = 9,49$). Значения коэффициентов Пирсона (0,12) и Чупрова (0,09) незначительны и при оценке по χ^2 несущественны. Разность значений индекса Шеннона (см. табл. 1) равна 0,12 и несущественна ($t_{\text{факт}} = 1,7$; $t_{\text{ст}} = 1,96$).

У этого признака индексы разнообразия изменялись от 5,15 до 6,20 %, что меньше критического значения 10 %. Это подтверждает отсутствие различий в разнообразии вкуса ядра орехов лещины, произрастающих в разных формациях (табл. 8). Несмотря на достоверное отличие значений коэффициентов вариации (см. табл. 1) в 2,7 % ($t_{\text{факт}} = 2,14$; $t_{\text{ст}} = 1,96$) доля орехов с ядром, имеющем высокое вкусовое качество (хороший – очень хороший), примерно одинакова: на участках произрастания лещины вместе с дубом – 73 %, с пихтой – 72 % (табл. 8).

Таблица 8

Распределение орехов лещины по вкусу ядра, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Вкус ядра, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Очень плохой с привкусом горечи, гнили	0,013 / 0	3,00	2,375 / 2,228	0,032 / 0
Плохой с привкусом горечи	0,067 / 0,040	6,00	4,750 / 4,456	0,320 / 0,178
Посредственный	0,189 / 0,243	9,00	7,125 / 6,684	1,343 / 1,621
Хороший	0,441 / 0,425	12,00	9,500 / 8,911	4,190 / 3,790
Очень хороший, сладковатый	0,290 / 0,292	15,00	11,875 / 11,139	3,439 / 3,257
<i>Среднее</i>	–	–	7,125 / 6,684	1,865 / 1,769

Выход ядра. Значение коэффициента вариации (см. табл. 1) в пихтовой формации достоверно выше на 11,81 % ($t_{\text{факт}} = 2,97$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Оценка по остальным методам указала на противоположную тенденцию. Так, в процентном выражении выход ядра у орехов лещины в дубовой формации составил $36,01 \pm 0,114$ %, в пихтовой – $34,06 \pm 0,092$ %. Отличие существенно ($t_{\text{факт}} = 5,29$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Балльная оценка содержания ядра у орехов лещины выше в выборке из дубовой формации – $3,13 \pm 0,114$ балла, в пихтовой – $2,15 \pm 0,095$ балла (см. табл. 1). Отличие в 0,98 балла существенно ($t_{\text{факт}} = 6,74$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Оценка по значениям χ^2 подтвердила гипотезу ($\chi^2_{\text{факт}} = 66,7$; $\chi^2_{\text{ст}} = 9,49$). Значения коэффициентов Пирсона (0,32) и Чупрова (0,25) указали на наличие относительно небольшой по силе связи.

Таблица 9

Распределение орехов лещины по выходу ядра, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Выход ядра, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Очень низкий	0,401 / 0,721	1,33	1,033 / 0,728	0,414 / 0,525
Низкий	0,343 / 0,169	1,39	1,079 / 0,761	0,371 / 0,129
Средний	0,195 / 0,066	4,72	3,665 / 2,585	0,716 / 0,172
Высокий	0,051 / 0,027	6,67	5,179 / 3,653	0,262 / 0,097
Очень высокий	0,010 / 0,020	6,67	5,179 / 3,653	0,052 / 0,061
<i>Среднее</i>	–	–	3,227 / 2,276	0,363 / 0,197

Отличие разнообразия по значениям индекса Шеннона на участках с преимущественным распространением дуба и пихты составило 0,53 (см. табл. 1) и достоверно ($t_{\text{факт}} = 5,56$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Фактические разности индекса разнообразия 29,47...45,73 % выше 10 % и также указывают на достоверное превышение разнообразия по выходу ядра у лещины, произрастающей под пологом дуба (табл. 9), где доля орехов с выходом ядра средний – очень высокий составила 26 %, а в пихте – 11 %.

Общий балл качества плодов. Показатель определяет ценность плодов с учетом величины и значимости хозяйственно-ценных признаков качества орехов лещины [3, 17]. В данном случае он является одним из показателей разнообразия орехов лещины, а не результирующим. Его среднее балльное значение было несколько выше (на 5,12 %) у лещины, произрастающей в дубовой формации (см. табл. 1). Отличие в 1,95 балла существенно ($t_{\text{факт}} = 5,29$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). По значению коэффициента вариации разнообразие здесь достоверно выше – на 1,85 % ($t_{\text{факт}} = 2,51$; $t_{\text{ст}} = 1,96$). Оценка сопряженности по χ^2 в связи с ограничениями для вычислений не производилась [18]. Индекс Шеннона в обоих случаях имел одинаковое значение – 1,15.

У признака разница по *IRRR* составляет 1,49 %, по *IRRRD* – 6,46 %, что указывает на отсутствие отличия разнообразия показателя в разных формациях (табл. 10).

Таблица 10

Распределение орехов лещины по общему баллу качества плодов, значения индексов разнообразия в дубовой / пихтовой формациях

Общий балл качества плодов, градация	Доля	Ранг градации	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>
Некачественные	0,007 / 0,010	22,9	13,333 / 13,134	0,090 / 0,131
Низкокачественные	0,253 / 0,389	23,0	13,391 / 13,191	3,382 / 5,127
Рядовые	0,684 / 0,585	33,0	19,213 / 18,926	13,067 / 11,067
Качественные	0,057 / 0,017	43,0	25,035 / 24,662	1,352 / 0,410
<i>Среднее</i>	–	–	17,743 / 17,478	4,473 / 4,184

Разнообразие по комплексу хозяйственно-ценных признаков орехов. Оцененное по различным методикам разнообразие орехов лещины, произрастающей в различных формациях, в некоторых случаях дало противоречивые результаты (табл. 11).

По методу с использованием χ^2 в 6 из 6 случаев (3 не определялись в связи с ограничениями применения метода) доказано различие между показателями, при низкой – средней связи с условиями формирования выборки. С учетом этого возможно допустить наличие различий в изменчивости плодов в формациях дуба и пихты.

По значениям индекса Шеннона, коэффициентам вариации можно выделить формацию, отличающуюся большим разнообразием, если сделать допущение, что в одной из них число превышений по отдельным показателям больше, чем в другой. Согласно данным табл. 11, по 6 показателям из 9 индекс Шеннона (по трем отличия отсутствовали; коэффициент вариации – 2 противоположных вывода; 1 – отсутствие отличия) имел большее значение в формации дуба.

Таблица 11

**Оценка разнообразия показателей орехов лещины в дубовой / пихтовой
формациях по различным методикам (при $\alpha = 0,05$)**

Показатель	Индекс Шеннона	<i>IRRR</i>	<i>IRRRD</i>	Коэффициент вариации	χ^2
Цвет скорлупы	H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Масса ореха	1 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0	H_1
Крепость скорлупы	1 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0	Не определялся
Неразрушаемость ядра	1 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0	Не определялся
Масса ядра	1 / 0	1 / 0	1 / 0	1 / 0	H_1
Наличие шелухи на ядре	1 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 1	H_1
Вкус ядра	H_0	H_0	H_0	1 / 0	H_0
Выход ядра	1 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 1	H_1
Общий балл	H_0	H_0	H_0	1 / 0	Не определялся

Примечание. 1 – разнообразие достоверно и больше; 0 – разнообразие достоверно и меньше; H_0 – различие недостоверно; H_1 – различие достоверно.

Индексы разнообразия, в отличие от предыдущих, позволяют выполнить оценку разнообразия как по отдельным признакам, так и по их совокупности [3, 16]. В дубовой формации определено среднее значение для *IRRR* – 4,14, *IRRRD* – 1,02, в пихтовой – 3,59 и 0,85 соответственно. Различие по *IRRR* составило 13,24 %, по *IRRRD* – 16,17 %, что в обоих случаях превышает критическое значение 10 %.

На основании этого можно сделать вывод о том, что под пологом дубовых насаждений, произрастающих в более мягких климатических условиях, на более плодородных почвах, у лещины наблюдается большее разнообразие плодов по хозяйственно-ценным признакам. При этом в обеих формациях имеются орехи с аналогичными признаками, но частота их встречаемости различна (см. табл. 2–10).

Необходимо отметить, что при сравнении методик (табл. 11) вывод о большем разнообразии отдельных показателей плодов лещины в конкретной формации совпадает следующим образом. Индекс Шеннона с *IRRR* и *IRRRD* в 9 случаях из 9, с коэффициентом вариации – в 5 случаях, с выводами по χ^2 о наличии различий – в 6 из 6 случаев.

Прогноз встречаемости форм лещины в формациях дуба и пихты. Для научной и практической деятельности важным является прогноз наличия и частоты встречаемости особей с отдельными или комплексом признаков в естественных популяциях. Одной из методологических основ, позволяющих выполнить его, является закон параллелизма. Согласно ему, наличие отдельных признаков у вида предполагает наличие у него особей с такими признаками [15]. Выполненная на этой основе оценка частот и встречаемости форм по наличию отдельных признаков у ореха грецкого [14] указала на значительную корреляцию показателей ($r = 0,94$).

Базируясь на данных принципах составлен прогноз встречаемости форм лещины с различными признаками орехов в дубовой (Д) и пихтовой (Пх) формациях (табл. 12).

Таблица 12

**Прогноз встречаемости форм лещины с различными признаками,
произрастающей в дубовых и пихтовых формациях**

Показатель	Очень часто (25 % и более)	Часто (24,9...10 %)	Нечасто (9,9...1 %)	Редко (0,99...0,5 %)
Цвет скорлупы	Темные, матовые тона (Д, Пх); тона средней интенсивности (Д, Пх)	Светлые тона, блестящие (Пх)	Темные тона, землистого оттенка (Д, Пх); светлые тона, блестящие (Д)	–
Масса ореха	Очень мелкие (Д, Пх); мелкие (Д)	Мелкие (Пх); средние (Д)	Средние (Пх); крупные (Д, Пх)	–
Крепость скорлупы	Раскалывается со средним усилием (Д, Пх)	Раскалывается с трудом (Д, Пх); раскалывается легко (Д, Пх)	Раскалывается при большом усилии (Д, Пх)	–
Наличие шелухи на ядре	Ядро средне покрыто шелухой (Д, Пх); ядро слабо покрыто шелухой (Д, Пх)	Ядро без шелухи (Д)	Ядро сильно покрыто шелухой (Д, Пх); ядро без шелухи (Пх)	–
Неразрушаемость ядра	Ядро цельное (Д, Пх)	–	Ядро с отколовшимися средними кусками (Д, Пх); ядро с отколовшимися небольшими кусочками (Д)	Ядро с отколовшимися небольшими кусочками (Пх)
Масса ядра	Очень мелкие (Д, Пх); мелкие (Д)	Мелкие (Пх)	Средние (Д, Пх); крупные (Д)	Крупные (Пх)
Вкус ядра	Хороший (Д, Пх); очень хороший, сладковатый (Д, Пх)	Посредственный (Д, Пх)	Плохой с привкусом горечи (Д, Пх); очень плохой с привкусом горечи, гнили (Д)	–
Выход ядра	Очень низкий (Д, Пх); низкий (Д)	Низкий (Пх); средний (Д)	Средний (Пх); высокий (Д, Пх); очень высокий (Д, Пх)	–
Общий балл качества орехов	Низкокачественные (Д, Пх); рядовые (Д, Пх)	–	Качественные (Д, Пх); некачественные (Пх)	Некачественные (Д)

Встречаемость наиболее ценных в хозяйственном отношении особей прогнозируется с различной частотой. Так, по цвету скорлупы, массе ореха, наличию шелухи на ядре – часто–нечасто; по крепости скорлупы – часто; по неразрушаемости, вкусу ядра – очень часто; по массе ядра – нечасто, редко; по выходу ядра, общему баллу качества плодов – нечасто.

Данные, представленные в табл. 12, указывают на прогнозируемое наличие и частоту встречаемости форм лещины с конкретными признаками плодов. При этом после их выделения, например для целей селекции, обязательной является проверка на генетическую обусловленность признака [22].

Выводы

1. У лещины в дубовой и пихтовой формациях имеются орехи с аналогичными признаками, но частота их встречаемости может отличаться.

2. В балльном выражении растения лещины, произрастающие в дубовой формации, имеют достоверно большие значения по массе ореха, наличию шелухи, массе и выходу ядра, общей ценности плодов. Неразрушаемость ядра у орехов лещины в пихтовой формации выше, чем в дубовой. Отличия несущественны по цвету, крепости скорлупы и выходу ядра.

3. У лещины под пологом дубовых насаждений наблюдается большее разнообразие плодов по массе орехов, крепости скорлупы, наличию шелухи, неразрушаемости, массе и выходу ядра. По цвету скорлупы, вкусу и общей балльной оценке различий разнообразия в формациях не установлено.

4. При оценке по различным методикам выводы о разнообразии показателей плодов лещины в конкретных условиях совпали полностью между индексом Шеннона, *IRRR*, *IRRRD* и χ^2 .

5. Разнообразие орехов у лещины обыкновенной, произрастающей в составе дубовой формации, выше по сравнению с особями из пихтовой формации.

6. Наличие особей с ценными признаками плодов прогнозируется в обеих формациях.

7. Встречаемость наиболее ценных в хозяйственном отношении особей в формациях прогнозируется с различной частотой. Так, по цвету скорлупы, массе ореха, наличию шелухи на ядре – часто–нечасто; по крепости скорлупы – часто; по неразрушаемости, вкусу ядра – очень часто; по массе ядра – нечасто, редко; по выходу ядра, общему баллу качества плодов – нечасто.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Байрамова Д.Б. Генофонд орехоплодных культур в Азербайджане // Плодоводство. 2014. Т. 26. С. 389–393. [Bayramova D.B. The Gene Pool of Nut Crops in Azerbaijan. *Plodovodstvo*, 2014, vol. 26, pp. 389–393].

2. Баканов А.И. Количественные методы экологии и гидробиологии // Сб. науч. тр., посвящ. памяти А.И. Баканова / Отв. ред. чл.-кор. РАН Розенберг Г.С. Тольятти: ИЦ РАН, 2005. 404 с. [Bakanov A.I. Quantitative Methods of Ecology and Hydrobiology. *Collection of Scientific Papers Dedicated to the Memory of A.I. Bakanov*. Togliatti, SC RAS Publ., 2005. 404 p.].

3. Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И. Модели для оценки биоразнообразия на основе относительной энтропии: свидетельство о регистрации базы данных RUS 2019620438 от 20.03.2019. [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].

4. Биганова С.Г., Сухоруких Ю.И., Пчихачев Э.К., Фомичева Е.О. Некоторые программные и методические аспекты селекции лещины (фундука) на Западном Кавказе // Новые технологии. 2016. Вып. 4. С. 103–109. [Biganova S.G., Sukhorukikh Yu.I., Pchihachev E.K., Fomicheva C.O. Some Program and Methodical Aspects of Hazelnut Selection in the Western Caucasus. *Novye tehnologii* [New Technologies], 2016, no. 4, pp. 103–109].

5. Вавилов Н.И. Теоретические основы селекции растений. Т. 1: Общая селекция растений М.; Л.: Сельхозгиз, 1935. 1043 с. [Vavilov N.I. *The Theoretical Basis of Plant Breeding*. Vol. 1. General Plant Breeding. Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1935. 1043 p.].

6. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. 512 с. [Kulaichev A.P. *Methods and Tools for Integrated Data Analysis*. Moscow, FORUM: INFRA-M Publ., 2006. 512 p.]

7. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 352 с. [Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 352 p.]

8. Макаров Ю.И. Особенности роста и развития ели обыкновенной под влиянием внутривидового полиморфизма // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 87–97. [Makarov Yu.I. Fir Spruce Growth and Development under the Influence of Intraspecific Polymorphism. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 3, pp. 87–97]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.3.87](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.87), URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e9b/makarov.pdf>

9. Махно В.Г., Черпурной В.С. Расширение ареала возделывания фундука в нетрадиционные регионы Российской Федерации // Инновационные технологии в современном садоводстве. Краснодар: Кубан. гос. аграр. ун-т, 2014. С. 109–125. [Makhno V.G., Cherpurnoy V.S. Expansion of the Cultivation Range of Hazelnuts in Non-Traditional Regions of the Russian Federation. *Innovative Technologies in Modern Gardening*. Krasnodar, KubSAU Publ., 2014, pp. 109–125].

10. Пленкина Г.А., Фирсова С.В., Софронов А.П. Продуктивность нетрадиционных садовых культур в условиях Кировской области // Аграр. наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 4(53). С. 26–32. [Plenkina G.A., Firsova S.V., Sofronov A.P. Productivity of Non-Traditional Horticultural Crops in Kirov Region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* [Agricultural Science Euro-North-East], 2016, no. 4(53), pp. 26–32]. DOI: [10.30766/2072-9081.2016.53.4.26-32](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2016.53.4.26-32)

11. Попов Г.Д., Черенкова Т.А. Биоразнообразие лещины – основной источник селекции // Интродукция нетрадиционных и редких растений. Т. 1: Плодовые, ягодные, редкие и нетрадиционные садовые культуры / Всерос. НИИ садоводства им. И.В. Мичурин. Воронеж: Кварта, 2008. С. 182–183. [Popov G.D., Cherenkova T.A. Hazel Biodiversity – the Main Source of Breeding. *Introduction of Unusual and Rare Plants*. Vol. 1. Fruit, Berry, Rare and Unusual Garden Crops. All-Russian Research Institute of Horticulture named after I.V. Michurin. Voronezh, Kvarata Publ., 2008, pp. 182–183].

12. Семенютин 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. шк. «Парадигма»: сб. науч. ст. Т. 8: Биология. Химия. Земеделие. Варна: ЦНИИ «Парадигма», 2015. С. 167–189. [Semenyutina 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. Agriculture. Varna, Paradigma Publ., 2015, pp. 167–189].

13. Софронов А.П. Хозяйственная оценка орехов лещины обыкновенной в Кировской области // Актуальные вопросы аграрной науки: теория и практика. Киров: Вятск. гос. с.-х. акад., 2014. С. 193–195. [Sofronov A.P. Economic Valuation of Common Hazelnuts in Kirov Region. *Current Issues of Agrarian Science: Theory and Practice*. Kirov, VGSHA Publ., 2014, pp. 193–195].

14. Сухоруких Ю.И. Избранные труды. Кн. 2: Орехоплодные. Майкоп: Качество, 2008. 396 с. [Sukhorukikh Yu.I. *Selected Papers*. Book 2: Nut Plants. Maikop, Kachestvo Publ., 2008. 396 p.]

15. Сухоруких Ю.И. Закон параллелизма как дополнение к закону гомологических рядов в наследственной изменчивости Н.И. Вавилова // Вестн. Майкоп. гос. технол. ун-та. 2010. Вып. № 2. С. 19–23. [Sukhorukikh Yu.I. Parallelism Law as a Supplement to the Law of Homologous Series in the N.I. Vavilov's Hereditary Variation. *Vestnik Maikopskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Maikop State Technological University], 2010, iss. 2, pp. 19–23].

16. Сухоруких Ю.И., Биганова С.Г. Изучение изменчивости скорлупы орехов лещины с использованием относительной энтропии // Агроэкология, мелиорация и защитное лесоразведение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. М.: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. С. 329–333. [Sukhorukikh Yu.I., Biganova S.G. Study on Diversity of Walnut Shell with the Use of Relative Entropy. *Agroecology, Reclamation and Protective Forestation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Moscow, FSC Agroecology RAS Publ., 2018, pp. 329–333].

17. Сухоруких Ю.И., Биганова С.Г., Уджуху М.И., Орлов Б.П., Трушева Н.А., Черноштанов Н.А. Лесные плодовые виды Северо-Западного Кавказа. 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*. Майкоп, Kachestvo Publ., 2010. 192 p.].

18. Терентьев П.В., Ростова Н.С. Практикум по биометрии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. 152 с. [Terent'yev P.V., Rostova N.S. *Workshop on Biometrics*. Leningrad, LGU Publ., 1977. 152 p.].

19. Тимофеев Т.И., Муратов В.А. Пищевые продукты и биологически активные добавки из орехов фундука современных сортов. Краснодар: КубГАУ, 2017. 175 с. [Timofeyenko T.I., Muratov V.A. *Food Products and Dietary Supplements Made of Hazelnuts of Modern Cultivars*. Krasnodar, KubSAU Publ., 2017. 175 p.].

20. Хасаяева З.Б., Асадулаев З.М., Залибеков М.Д. Внутрипопуляционная изменчивость морфологических признаков плодов *Corylus colurna* L. в Дагестане // Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: XII съезд Рус. ботан. о-ва. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. Ч. 1. С. 86–88. [Khasayeva Z.B., Asadulayev Z.M., Zalibekov M.D. The Intrapopulation Variability of the Morphological Features of *Corylus colurna* L. Fruits in Dagestan. *Fundamental and Applied Problems of Botany at the Beginning of the 21st Century: The 12th Meeting of the Russian Botanical Society*. Petrozavodsk, KRC RAN Publ., 2008, part 1, pp. 86–88].

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

22. Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Селекция лесных и декоративных древесных растений. М.: МГУЛ, 2014. 552 с. [Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Selection of Forest and Ornamental Woody Plants*. Moscow, MGUL Publ., 2014. 552 p.].

23. 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].

24. Щепотьев Ф.Л., Чебанов В.И., Образцов В.М., Кругликов И.В., Блашников Г.Т. Программа и методика селекции и сортоизучения орехоплодных культур. Воронеж: ЦНИИЛГиС, 1976. 81 с. [Shchepot'yev F.L., Chebanov V.I., Obratsov V.M., Kruglikov I.V., Blashnikov G.T. *Program and Methodology of Breeding and Sorting out Nut Crops*. Voronezh, TSNIILGiS Publ., 1976. 81 p.].

25. Aydoğan M., Demiryürek K., Abacı N.İ. World Hazelnut Trade Networks. *Acta Horticulturae*, 2018, vol. 1226, pp. 429–436. DOI: [10.17660/ActaHortic.2018.1226.65](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1226.65)

26. Blagoeva E., Nikolova M. Chemical Composition of Selected Hazelnut Cultivars. *Rastenievudni Nauki* [Plant science], 2009, vol. 46, no. 1, pp. 85–88.

27. 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. *Rastenievudni Nauki* [Plant science], 2011, vol. 48, no. 1, pp. 111–114.

28. Boccacci P., Botta R., Rovira M. Genetic Diversity of Hazelnut (*Corylus avellana* L.) Germplasm in Northeastern Spain. *HortScience*, 2008, vol. 43, iss. 3, pp. 667–672. DOI: [10.21273/HORTSCI.43.3.667](https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.667)
29. 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: [10.1016/j.foodchem.2008.02.060](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.060)
30. Ercisli S., Ozturk I., Kara M., Kalkan F., Seker H., Duyar O., Erturk Y. Physical Properties of Hazelnuts. *International Agrophysics*, 2011, vol. 25, no. 2, pp. 115–121.
31. Hutcheson K. A Test for Comparing Diversities Based on the Shannon Formula. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, vol. 29, iss. 1, pp. 151–154. DOI: [10.1016/0022-5193\(70\)90124-4](https://doi.org/10.1016/0022-5193(70)90124-4)
32. Korac M., Cerovic S., Golosin B., Korac J., Ninic-Todorovic J., Almasi R., Balaz J. *Leska*. Novi Sad, Technosoft, 2000, pp. 90–93.
33. Mitrovic M., Miletic R., Lukic M. Pomo-Technological Properties of Introduced Hazelnut Cultivars. *Journal of Pomology*, 2009, vol. 43, iss. 165–166, pp. 53–56.
34. 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.
35. Nikolova M. Significance, Status, Problems and Perspectives of Development of the Hazelnut in the World and in Bulgaria. *Selskostopanska Nauka* [Agricultural Science], 2007, vol. 40, no. 5, pp. 29–33.
36. Nikolova M. Phenological Traits and Reproductive Characteristics of Grafted Hazelnut Trees. *Rastenievudni Nauki* [Plant science], 2009, vol. 46, no. 1, pp. 81–84.
37. 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*, 2015, vol. 57, iss. 4, pp. 245–250. DOI: [10.1515/ffp-2015-0026](https://doi.org/10.1515/ffp-2015-0026)
38. Song X.J., Sun X.J., Peng X.X., Cristofori V., Bacchetta L. Wu Z.X. Italian-Chinese Cooperation for a Fruitful Management and Utilization of Hazelnut (*Corylus* spp.) Genetic Resources. *Acta Horticulturae*, 2018, vol. 1226, pp. 109–114 DOI: [10.17660/ActaHortic.2018.1226.15](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1226.15)
39. Veriankaitė L., Šaulienė I., Bukantis A. The Modelling of Climate Change Influence on Plant Flowering Shift in Lithuania. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2010, vol. 97, no. 1, pp. 41–48.

DIVERSITY OF COMMON HAZELNUTS (*Corylus avellana* L.) AND OCCURRENCE FORECAST OF ITS FORMS IN THE NORTH-WESTERN CAUCASUS

S.G. Biganova¹, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-3358-2018](https://orcid.org/0000-0002-0581-3612),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612>

Yu.I. Sukhorukikh¹, Doctor of Agriculture, Prof.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>

K.N. Kulik², Doctor of Agriculture, Prof., Acad. of RAS; ResearcherID: [U-4690-2017](https://orcid.org/0000-0001-7124-8116),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7124-8116>

A.K. Kulik², Candidate of Agriculture; ResearcherID: [W-4034-2018](https://orcid.org/0000-0001-5927-7336),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5927-7336>

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

²Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Forests, RAS, prosp. Universitetskiiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; e-mail: kulikkn@yandex.ru

One of the most significant issues in common hazelnut biology and selection is the diversity (polymorphism) assessment of its fruits and the occurrence prediction of its forms with economically valuable features in natural populations, which are the source of the most valuable gene pool of the species. The research purpose is to identify the hazelnut diversity and to predict the occurrence of its forms in natural oak and fir forest formations of the studied region. For analysis, one nut was randomly selected from each plant of oak (297 pcs.) and fir (301 pcs.) forest formations. We studied the main economically valuable parameters of hazelnuts: kernel weight and yield, nut weight, fruit quality total score, nutshell strength and color, taste, indestructibility and presence of husk on a kernel. The significance of differences in entropy, its dispersion and degree of freedom, diversity by the Shannon index, variation coefficients, χ^2 values, Pearson and Chuprov coefficients were determined by known methods. The index of distributed rank diversity (*IRRR*) was calculated from the ratio of the sum of the products of the relative entropy of a feature by its rank to the number of scales of this feature. The index of distributed rank diversity including share (*IRRRD*) for a single feature was defined as the product of the *IRRR* by the share of the feature of the corresponding scale. The forecast of the presence of hazelnut forms is made according to the law of parallelism. It was found that hazel has nuts with similar features in oak and fir forest formations. The conclusions on a greater variety of parameters of hazel fruits, growing in the composition of oak forest formation, in comparison with fir forest formation coincided completely with the Shannon index, *IRRR*, *IRRRD* and χ^2 . The occurrence of the most economically valuable forms in forest formations is predicted with varying frequency.

For citation: 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: 10.37482/0536-1036-2020-3-55-71

Keywords: common hazel, nuts, economically valuable indicators, diversity, Shannon index, coefficient of variation, index of distributed rank diversity, index of distributed rank diversity including share, diversity of forms, occurrence forecast.

Поступила 11.06.19 / Received on June 11, 2019

УДК 630*182

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СЕЗОННОЕ РАЗВИТИЕ ХВОЙНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ (КАРЕЛИЯ)

*И.Т. Кищенко, д-р биол. наук, проф., чл.-кор. РАН; ResearcherID: AAC-1083-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1039-1020>*

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: ivanki@karelia.ru

Наблюдения за сезонным развитием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), елей сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) проводили в течение 15 лет в Южной Карелии (средняя подзона тайги). Фенологические наблюдения выполняли через каждые 2-3 дня. Фиксировали время прохождения таких фенофаз, как набухание и распускание вегетативных почек, начало и окончание роста побегов, обособление на побегах зимующих почек, распускание, завершение роста, расцветивание и опадение листьев, опробковение побегов. Цель исследования – изучение сходства и различий в сезонном развитии лесобразующих видов Карелии под влиянием главных климатических факторов. Для установления искомым связей использовали методы элементарной статистики, корреляционный и регрессионный анализ. Обнаружено, что сроки наступления большей части фенофаз у изученных видов в значительной мере зависят от температуры воздуха, в меньшей – от влажности воздуха, атмосферных осадков и солнечной радиации. Зависимость между сроками наступления фенофаз и изучаемыми климатическими факторами носит прямолинейный характер, а ее сила зависит от биологии вида и специфики самой фенофазы. Особенности развития хвойных растений во многом определяются состоянием среды не только текущего года, но и предшествующего. Повышение температуры и влажности воздуха, а также усиление солнечной радиации в июле предшествующего года заметно ускоряют фенологическое развитие деревьев. По возрастанию степени устойчивости к климатическим условиям таежной зоны изученные виды можно расположить в следующем порядке: *Picea abies*, *Picea obovata*, *Pinus sylvestris* и *Larix sibirica*. Установлено, что в процессе сезонного развития наименее требовательна к температурному режиму воздуха *Larix sibirica*, наиболее требовательна – *Picea abies*.

Для цитирования: Кищенко И.Т. Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесобразующих видов в таежной зоне (Карелия) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 72–82. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82

Ключевые слова: таежная зона, хвойные растения, сосна, ель, лиственница, климатические факторы, сезонное развитие, фенология.

Введение

Изучению сезонного развития лесобразующих видов уделяется большое внимание учеными как нашей страны [2, 6, 8, 11, 18], так и зарубежными [19, 21, 23, 24, 28]. Теоретическая ценность таких исследований заключается в познании закономерностей сезонных изменений растений, влияния экологических факторов на сроки протекания фенофаз, в выяснении экстремальных и оптимальных значений факторов для конкретного вида. Сравнивая особенности развития аборигенных и интродуцированных видов, можно объективно оценить

перспективность последних [9, 13, 14]. В практике лесосеменного дела необходимы данные о сроках пыления и цветения деревьев, созревания их семян и плодов для выяснения периодичности семенных годов в разных районах у различных видов, учета урожая семян и плодов по отдельным годам, установления оптимальных сроков их заготовки. В лесокультурном деле на основе фенологических исследований планируются наиболее благоприятные сроки посева и посадки. В лесоводстве фенологическая информация используется для определения сроков рубок ухода, при проведении противопожарных мероприятий и лесоустроительных работ, в лесной таксации – для эффективной организации борьбы с вредителями растений и болезнями. Между тем многолетние исследования сезонного развития лесообразующих видов в Карелии ранее не проводились.

Цель исследования – изучение особенностей сезонного развития елей сибирской и европейской, сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, а также влияния на этот процесс температуры воздуха в условиях Южной Карелии.

Объекты и методы исследования

Наблюдения за сезонным развитием елей сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) проводили в Южной Карелии (средняя подзона тайги) на протяжении 15 лет. Средние возраст и высота деревьев *Picea obovata* – соответственно 32 года и 9,2 м, *Picea abies* – 31 год и 8,4 м, *Pinus sylvestris* – 26 лет и 8,8 м, *Larix sibirica* – 44 года и 14,0 м.

Фенологические наблюдения осуществляли ежегодно в течение вегетационного периода через каждые 2-3 дня, используя методические указания Н.Е. Булыгина [1]. Фиксировали время прохождения следующих фенофаз: набухание и распускание вегетативных почек; начало и окончание роста побегов; обследование на побегах зимующих почек; их распускание; завершение роста; расцветивание и опадение листьев; опробковение побегов. Фенофаза считалась наступившей, если она отмечалась не менее чем у 30 % побегов всех особей исследуемого вида. Среднесуточные показатели изучаемых фенофаз установлены за 15 лет и оценены на значимость различий между видами по критерию Стьюдента.

Метеорологические данные (среднесуточные параметры температуры воздуха, относительной влажности воздуха, количества атмосферных осадков и суммарной солнечной радиации) получены на Сулажгорской метеостанции (Карельская гидрометобсерватория), расположенной в 3 км к юго-западу от Ботанического сада Петрозаводского государственного университета.

Результаты наблюдений обработаны с помощью рекомендуемых для этих целей методов корреляционного (достоверность оценена по критерию Стьюдента) и регрессионного (по критерию Фишера) анализа [4].

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе анализа данных статистической обработки фенодат видов за 15-летний период наблюдений установлено, что ошибка их среднемноголетней величины, как правило, весьма незначительна и составляет около 2 сут.

Лишь у деревьев видов *Picea* для некоторых фенофаз ее значения увеличиваются до 5-6 сут. Вариабельность фенодат большей части фенофаз также не велика: среднеквадратическое отклонение не превышает 3–10 сут. Для немногих фенофаз этот показатель у деревьев видов *Picea* возрастает до 14–20 сут. Изучая развитие различных видов древесных растений в Белоруссии, Н.В. Шкутко [17] обнаружил, что погодичная изменчивость сроков начала тех или иных фенофаз может варьировать даже в гораздо больших пределах – от 12 до 27 сут.

Проведенные исследования показали, что ритмика сезонного развития изученных видов имеет свои специфические особенности (табл. 1).

Таблица 1

Среднеголетние данные сезонного развития хвойных лесобразователей

Фенофаза	Статистический показатель	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Picea obovata</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Larix sibirica</i>
Набухание вегетативных почек	M±m _M	4 V±1,2	15 V±1,9	15 V±1,9	31 IV±1,4
	σ	4,7	7,1	7,3	5,6
Разверзание вегетативных почек	M±m _M	24 V±1,2	28 V±1,4	25 V±2,0	7 V±1,7
	σ	4,7	5,2	7,9	6,5
Начало линейного роста побегов	M±m _M	9 V±1,2	28 V±1,4	25 V±2,0	25 V±2,5
	σ	4,7	5,2	7,9	9,8
Окончание линейного роста побегов	M±m _M	27 VII±1,1	2 VIII±3,8	27 VII±5,0	14 VII±2,3
	σ	4,2	13,8	19,4	9,0
Опробковение оснований побегов	M±m _M	22 VII±0,9	20 VII±2,1	19 VII±0,6	13 VI±0,8
	σ	3,4	7,9	2,3	3,3
Опробковение побегов по всей длине	M±m _M	8 VIII±1,8	24 VII±1,0	11 VII±5,0	20 VII±0,8
	σ	7,0	3,8	19,3	3,0
Обособление хвои на побегах	M±m _M	9 VI±1,3	6 VI±1,5	3 VI±1,4	13 V±1,7
	σ	5,1	5,4	5,4	6,6
Завершение роста и вызревание хвои	M±m _M	14 VII±2,9	14 VI±1,6	13 VI±6,4	21 V±1,7
	σ	11,3	6,1	6,1	6,6
Расцветивание отмирающей хвои	M±m _M	24 X±0,8	24 X±4,8	24 X±1,0	22 IX±7,9
	σ	3,1	4,5	3,8	20,6
Опадение хвои	M±m _M	25 XI±1,8	16 XI±1,2	15 XI±2,6	11 X±1,5
	σ	6,9	4,6	9,4	5,7
Обособление на побегах почек	M±m _M	25 VII±1,1	28 VII±5,0	29 VII±5,4	13 VIII±1,3
	σ	4,3	18,7	20,1	5,2

По среднеголетним данным скорее всего (31 IV–4 V) набухание вегетативных почек начинается у деревьев *Larix sibirica* и *Pinus sylvestris*, у деревьев вида *Picea* – лишь 15 V. Раньше всех (7 V) происходит разверзание почек у деревьев *Larix sibirica*, у деревьев других видов – на 3 недели позже.

Линейный рост побегов ранее всего (9 V) начинается у деревьев *Pinus sylvestris*, у деревьев других видов он отмечается лишь в последней декаде мая.

Обособление на побегах почек быстрее наступает у деревьев *Larix sibirica* (13 VII), у других видов – на 2 недели позже.

Заканчивается рост побегов ранее всего у деревьев *Larix sibirica* (14 VII), у деревьев остальных видов – только через 2–3 недели.

Наиболее ранние сроки (13 VI) опробковения оснований побегов отмечены у деревьев *Larix sibirica*, для деревьев других видов – 20–22 VII. Процесс опробковения побегов по всей длине у деревьев *Pinus sylvestris* и *Picea abies* заканчивается 8–11 VIII, у деревьев других видов – гораздо позже (20–24 VIII).

Ранее всего (3–6 VI) обособление листьев начинается у деревьев *Picea*, у деревьев других видов – на 7–10 суток позже.

Быстрее всех рост хвои завершается у деревьев *Larix sibirica* (1 VI), у деревьев видов *Picea* – в середине VI, а у деревьев *Pinus sylvestris* – даже в середине VII.

Первыми (22 IX) в фазу расцветивания отмирающих листьев вступают деревья *Larix sibirica*, другие виды – только через месяц. Раньше всего (11 X) опадение хвои (всей) начинается у *Larix sibirica*, спустя месяц опадает хвоя (старая) у деревьев видов *Picea* и только 25 XI – у деревьев *Pinus sylvestris*.

Полученные нами результаты свидетельствуют, что очередность прохождения фенофаз у изучаемых видов из года в год остается неизменной.

Как показали исследования ряда авторов [5, 7, 10, 13, 14], наиболее адаптированными в умеренной зоне России являются растения, которые рано начинают и рано заканчивают сезонное развитие. Согласно этому и исходя из наших данных, изученные виды по возрастанию степени устойчивости к условиям таежной зоны можно расположить в следующем порядке: *Picea abies*, *Picea obovate*, *Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*.

Другие исследователи [20, 25, 27, 28] убедительно доказали, что особенности развития различных видов растений обусловлены их неодинаковой требовательностью к экологическим факторам. Поэтому, определив диапазон толерантности основных фенофаз к экологическим факторам, можно судить о степени адаптации данного вида растений к условиям местообитания.

Проведенные исследования позволили установить, что температурный режим воздуха в момент наступления очередной фенофазы заметно отличается у изученных видов деревьев. Обнаружено, что набухание вегетативных почек у деревьев *Larix sibirica* и *Picea abies* начинается при самой прохладной погоде (температура воздуха – всего 5,3...6,6 °С, сумма положительных температур (далее – теплообеспеченность) – 74 и 106 °С соответственно). Эта фенофаза у деревьев других видов начинается при температуре 8,3...10,2 °С и 193...231 °С соответственно (табл. 2).

Таблица 2

**Среднемноголетние суточные значения экологических факторов
во время прохождения фенофаз хвойных лесобразователей**

Фенофаза	Фактор	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Picea obovata</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Larix sibirica</i>
Набухание вегетативных почек	T	6,6	8,3	10,2	5,3
	СПТ	106	193	231	74
	B	65	67	66	66
	O	1,6	2,2	1,9	1,0
	P	338	380	397	359

Продолжение табл. 2

Фенофаза	Фактор	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Picea obovata</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Larix sibirica</i>
Разверзание вегетативных почек	Т	8,0	10,0	13,1	7,0
	СПТ	274	301	386	123
	В	72	71	69	65
	О	1,9	1,4	2,2	1,6
	Р	318	416	411	390
Начало линейного роста побегов	Т	7,3	10,1	10,9	12,1
	СПТ	143	303	391	360
	В	66	72	66	64
	О	1,6	1,4	1,6	1,6
	Р	331	415	506	397
Окончание линейного роста побегов	Т	16,4	16,0	17,0	14,3
	СПТ	985	1178	1152	1466
	В	77	77	72	81
	О	3,6	0,7	0,5	1,7
	Р	435	419	431	266
Опробковение основания побегов	Т	16,2	15,9	15,9	16,3
	СПТ	1112	1058	1085	966
	В	80	79	77	75
	О	3,8	1,0	1,7	1,1
	Р	369	412	456	409
Опробковение побегов по всей длине	Т	16,2	12,6	10,6	12,6
	СПТ	1395	1429	156	1561
	В	15	81	86	85
	О	1,5	1,9	5,2	2,6
	Р	393	181	205	240
Обособление хвои на побегах	Т	12,5	11,9	14,3	7,0
	СПТ	471	402	426	172
	В	70	67	72	61
	О	2,0	1,6	2,5	0,2
	Р	370	470	353	452
Завершение роста и вызревание хвои	Т	14,5	13,0	15,3	9,5
	СПТ	829	529	573	250
	В	76	70	75	69
	О	3,1	1,0	2,2	3,2
	Р	428	396	341	349
Расцветивание отмирающей хвои	Т	3,1	3,0	3,4	5,4
	СПТ	1952	1952	1952	1823
	В	83	83	83	81
	О	8,4	8,4	8,4	1,9
	Р	2152	2152	1948	1075
Опадение хвои	Т	-2,2	1,5	2,4	3,4
	СПТ	1928	1917	1883	1932
	В	81	88	82	82
	О	0,2	8,0	5,0	8,4
	Р	489	2070	2262	1956

Окончание табл. 2

Фенофаза	Фактор	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Picea obovata</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Larix sibirica</i>
Обособление на побегах почек	T	13,0	15,8	15,8	14,5
	СПТ	1612	1200	1155	1454
	B	81	75	76	77
	O	1,5	1,2	2,5	0,4
	P	225	381	322	372

Примечание. T – среднесуточная температура воздуха, °C; СПТ – сумма положительных температур, °C; B – относительная влажность воздуха, %; O – количество атмосферных осадков, мм; P – солнечная радиация, кал/см².

Подобная закономерность прослеживается и в отношении фенофазы разverzания вегетативных почек. У деревьев *Larix sibirica* и *Picea abies* она начинается при температуре воздуха и сумме положительных температур 7,0...8,0 °C и 123...274 °C соответственно, у других видов – при 10,0...13,1 °C и 301...386 °C.

Начало линейного роста побегов при самых низких показателях теплообеспеченности (7,3 и 143 °C) отмечено у деревьев *Picea abies*, у остальных видов – при 10,1...12,1 °C и 303...391 °C соответственно.

Во время обособления на побегах почек у разных видов температура воздуха мало различается, достигая 13,0...15,0 °C. При этом теплообеспеченность у деревьев *Larix sibirica* по сравнению с другими видами меньше на 300 °C.

Рост побегов у деревьев *Larix sibirica* прекращается при понижении температуры воздуха до 14,3 °C и повышении теплообеспеченности до 766 °C, у других видов – при 16,0...17,0 °C и 985...1178 °C соответственно.

Опробковение оснований побегов у изученных видов начинается при одинаковых температуре воздуха и теплообеспеченности – 15,9...16,3 °C и 966...1112 °C. Опробковение побегов по всей длине заканчивается у деревьев *Pinus sylvestris* при самой низкой температуре (10,6 °C), а у *Picea abies* – при самой высокой (16,2 °C).

Начало обособления хвои на побегах у *Larix sibirica* отмечается при наиболее низких значениях температуры (7,0 °C) и теплообеспеченности (172 °C). У деревьев вида *Picea* эта фенофаза начинается только при 11,9...12,5 °C и 402...425 °C, у деревьев *Pinus sylvestris* – при 14,3 °C и 471 °C.

Завершение роста и вызревание хвои у деревьев *Larix sibirica* также наблюдается при наиболее прохладном температурном режиме – 9,5 °C и 250 °C, у других видов – соответственно при 13,0...15,3 °C и 529...629 °C.

Расцветивание отмирающей хвои у изученных видов начинается при близких значениях температурного режима – около 3,0...5,0 °C и 2000 °C.

Опадение хвои при наиболее теплой погоде отмечается у деревьев *Larix sibirica* (3,4 °C), а при наиболее холодной – у *Picea abies* (–2,2 °C), у остальных видов – при 1,5...2,4 °C. Теплообеспеченность при этом у разных видов одинакова и составляет около 2000 °C.

Определяющее влияние температуры воздуха текущей вегетации на сезонное развитие хвойных растений обнаружено ранее многими исследователями [3, 12, 16, 20, 28].

В отличие от температурного режима воздуха значения относительной влажности воздуха, количества атмосферных осадков и суммарной солнечной

радиации во время прохождения различных фенофаз у изученных видов мало различаются, потому делать вывод об их конкретном влиянии не представляется возможным.

Ранее установлено [15, 21, 23, 26], что особенности развития хвойных растений во многом определяются состоянием среды не только текущего, но и предшествующего года. Особенно заметно влияние июльской температуры воздуха, предшествующей развитию вегетации.

Для того, чтобы судить о степени влияния экологических факторов июля предшествующего года на сроки наступления фенофаз текущей вегетации был проведен корреляционный анализ. Оказалось, что направление и сила искомых связей могут существенно изменяться в зависимости от биологии вида, специфики фенофазы и конкретного фактора.

Результаты корреляционного анализа наших исследований свидетельствуют о том, что повышение температуры воздуха июля предшествующего года заметно ускоряет наступление фазы набухания вегетативных почек у деревьев *Picea obovata*, *Picea abies* и *Pinus* ($r = 0,4 \dots 0,9$). Степень влияния на *Larix sibirica* гораздо менее выражена ($r = 0,2 \dots 0,7$).

Исследования показали, что повышение относительной влажности воздуха благоприятствует более раннему наступлению большей части фенофаз у всех изученных видов деревьев ($r = 0,6 \dots 0,9$). Такое же положительное, но гораздо более слабое влияние на развитие деревьев оказывают и атмосферные осадки ($r = 0,1 \dots 0,5$).

Усиление солнечной радиации заметно ускоряет прохождение фенофаз у деревьев изученных видов, за исключением фазы расцветивания отмирающей хвои ($r = 0,3 \dots 0,9$). Кроме того, обнаружена недостоверная корреляция этого фактора у деревьев *Larix sibirica* в отношении таких фенофаз, как окончание линейного роста побегов, опробкование побегов, обособление хвои на побегах и завершение роста хвои.

Таким образом, температурный режим воздуха текущей и предшествующей вегетации в значительной степени влияет на особенности сезонного развития изученных хвойных лесобразующих видов в таежной зоне (Карелия).

В процессе регрессионного анализа апробированы 5 видов уравнений: гипербола, логарифмическая кривая, прямая, парабола 2-го и 3-го порядков. Установлено, что кривая, отображающая влияние температуры воздуха на наступление тех или иных фенофаз, может быть описана линейным уравнением:

$$y = Ax_1 + Bx_2 + C,$$

где y – дата наступления фенофазы; x_1 – дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C ; x_2 – среднесуточная температура воздуха, $^\circ\text{C}$; A , B и C – коэффициенты и свободный член уравнения.

Например, для фенофаз деревьев *Picea abies* эти уравнения имеют следующий вид:

набухание почек..... $y = 61,99 + 0,04x_1 + 1,68x_2$;

разверзание почек..... $y = 78,43 + 0,12x_1 + 0,29x_2$;

начало линейного роста побегов..... $y = 79,29 + 0,14x_1 + 0,06x_2$;

окончание линейного роста побегов..... $y = 105,99 + 0,16x_1 + 2,78x_2$;

опробкование оснований побегов..... $y = 138,35 + 0,13x_1 - 0,43x_2$;

опробкование побегов по всей длине..... $y = 2,36 + 0,12x_1 + 6,71x_2$;

обособление хвои на побегах..... $y = 81,64 + 0,23x_1 + 0,02x_2$;
завершение роста хвои..... $y = 86,51 + 0,26x_1 + 0,36x_2$;
опадение хвои..... $y = 250,04 + 0,28x_1 + 1,68x_2$;
обособление почек возобновления..... $y = 84,79 + 0,10x_1 + 4,70x_2$.

Приведенные уравнения можно рассматривать в качестве моделей, описывающих зависимость сроков наступления фенофаз под влиянием температуры воздуха и позволяющих прогнозировать процессы развития деревьев.

Выводы

1. Сроки наступления большей части фенофаз у изученных видов в значительной мере зависят от температуры воздуха, в меньшей – от влажности воздуха, количества атмосферных осадков и солнечной радиации. Зависимость между сроками наступления фенофаз и климатическими факторами носит прямолинейный характер, а ее сила определяется биологией вида и спецификой самой фенофазы. Кривая, отображающая влияние температуры воздуха на наступление тех или иных фенофаз, может быть описана линейным уравнением.

2. Особенности развития хвойных растений во многом определяются состоянием среды не только текущего года, но и предшествующего. Повышение температуры и влажности воздуха, а также усиление солнечной радиации в июле предшествующего вегетационного периода заметно ускоряют фенологическое развитие изученных деревьев.

3. Наименее требовательными к температурному режиму воздуха в процессе сезонного развития являются деревья *Larix sibirica*, наиболее требовательны – *Picea abies*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Булыгин Н.Е. Фенологические наблюдения над древесными растениями. Л.: Изд-во ЛТА, 1979. 79 с. [Bulygin N.E. *Phenological Observations on Woody Plants*. Leningrad, LTA Publ., 1979. 79 p.].

2. Елагин И.Н. Сезонное развитие сосновых лесов. Новосибирск: Наука, 1976. 432 с. [Elagin I.N. *Seasonal Development of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 432 p.].

3. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Особенности роста вегетативных органов сосны обыкновенной в лесостепном Предбайкалье // Экология. 2007. № 6. С. 409–416. [Zabuga V.F., Zabuga G.A. Specific Features of the Growth of Scots Pine Vegetative Organs in the Forest-Steppe Zone of Cisbaikalia. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2007, no. 6, pp. 409–416]. DOI: [10.1134/S1067413607060021](https://doi.org/10.1134/S1067413607060021)

4. Зайцев Г.Н. Фенология древесных растений. М.: Наука, 1981. 278 с. [Zaytsev G.N. *Phenology of Woody Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 278 p.].

5. Кищенко И.Т. Влияние экологических факторов на развитие представителей рода *Picea* (*Pinaceae*) в условиях интродукции // Ботан. журн. 1995. № 8. С. 11–18. [Kishchenko I.T. Effect of Ecological Factors on the Development of Some Representatives of the Genus *Picea* (*Pinaceae*) under Introduction Conditions. *Botanicheskiy Zhurnal*, 1995, no. 8, pp. 11–18].

6. Кищенко И.Т. Рост и развитие аборигенных и интродуцированных видов семейства *Pinaceae* Lindl. в условиях Карелии. Петрозаводск: ПетрГУ, 2000. 214 с. [Kishchenko I.T. *Growth and Development of Aboriginal and Introduced Species of the Family Pinaceae Lindl. in the Conditions of Karelia*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2000. 214 p.].

7. Лазарева С.М. Рост боковых побегов и продолжительность жизни хвои видов *Picea* в Левобережном Заволжье // Хвойные бореальной зоны. 2014. Т. XXXII, № 5-6. С. 44–49. [Lazareva S.M. Growth of Side Shoots and Life of Needles on the Left Bank of *Picea* in the Middle Volga. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2014, vol. 32, no. 5-6, pp. 44–49].

8. Лапин П.И. Сезонный ритм развития древесных растений и его значение для интродукции // Бюллетень ГБС АН СССР. 1987. Вып. 65. С. 12–18. [Lapin P.I. Seasonal Rhythm of the Development of Woody Plants and Its Importance for Introduction. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada AN SSSR* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1987, vol. 65, pp. 12–18].

9. Мамаев С.А., Махиев А.К. Проблемы биологического разнообразия и его поддержания в лесных экосистемах // Лесоведение. 1996. № 5. С. 3–10. [Mamayev S.A., Makhiyev A.K. Problems of Biological Diversity and Its Maintenance in Forest Ecosystems. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1996, no. 5, pp. 3–10].

10. Мухина Л.Н., Александрова М.С., Каушанова О.А. Комплексная оценка состояния лиственницы (*Larix* Mill.) в дендрарии ГБС РАН // Бюллетень ГБС. 2014. Вып. 3. С. 39–47. [Mukhina L.N., Alexandrova M.S., Kashtanova O.A. Integrated Assessment of Larch (*Larix* Mill.) in the Arboretum of Main Botanical Garden RAS. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 2014, iss. 3, pp. 39–47].

11. Наполков Н.В. Фенология главнейших древесно-кустарниковых пород в Раифской лесной даче Волжско-Камского госзаповедника ТАССР // Сб. тр. по лесн. хоз-ву Татар. лесн. опыт. станции. Тарту, 1964. № 16. С. 243–271. [Napolkov N.V. Phenology of the Most Important Tree-Shrubby Species in the Raifskaya Forest Dacha of the Volga-Kama State Reserve of the Tatar ASSR. *Collection of Papers on Forestry of the Tatar Forest Experimental Station*. Tartu, 1964, no. 16, pp. 243–271].

12. Паутова Н.В. Особенности фенологического развития и адаптации лиственницы сибирской в условиях Европейского Северо-Востока // Изв. Самар. НЦ РАН. 2011. Т. 13, № 1(4). С. 1020–1023. [Pautova N.V. Features of Phenological Development and Adaptation of Siberian Larch in the Conditions of European Northeast. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 1(4), pp. 1020–1023].

13. Плотникова Л.С. Научные основы интродукции и охраны древесных растений флоры СССР. М.: Наука, 1988. 263 с. [Plotnikova L.S. *Scientific Basis for Introduction and Protection of Woody Plants of the Flora of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 263 p.].

14. Термена Б.К., Выклюдок М.И., Горук О.И. О сезонном развитии древесных растений в связи с их адаптационными возможностями // Бюл. ГБС АН СССР. 1984. Вып. 130. С. 23–29. [Termena B.K., Vyklyuk M.I., Goruk O.I. Seasonal Development of Woody Plants Due to Their Adaptation Ability. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada AN SSSR* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1984, iss. 130, pp. 23–29].

15. Филатова О.В. Влияние экологических и наследственных факторов на формирование побегов сосны в культурах южной лесостепи УССР: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Харьков, 1989. 24 с. [Filatova O.V. *The Influence of Environmental and Genetic Factors on the Formation of Pine Shoots in the Cultures of the Southern Forest-Steppe of the Ukrainian SSR*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Kharkov, 1989. 24 p.].

16. Фролова Л.А. Термический фактор и фазы сезонного развития представителей рода Ель различных географических зон // Термический фактор в развитии растений в разных географических зонах: материалы всесоюз. конф. М., 1979. С. 32–34. [Frolova L.A. Thermal Factor and Phases of Seasonal Development of the Spruce Genus Representatives of Different Geographical Zones. *Thermal Factor in the Plant Development in Different Geographical Zones: Proceedings of the All-Union Conference*. Moscow, 1979, pp. 32–34].

17. Шкутко Н.В. Биологические основы интродукции хвойных растений в Белоруссии: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1984. 48 с. [Shkutko N.V. *Biological Bases of the Introduction of Conifers in Belarus*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1984. 48 p.].

18. Шкутко Н.В., Александрова М.С., Фролова Л.А. К методике фенологических наблюдений над хвойными растениями в ботанических садах // Бюл. ГБС АН СССР. 1974. Вып. 91. С. 8–14. [Shkutko N.V., Aleksandrova M.S., Frolova L.A. To the Method of Phenological Observations on Conifers in Botanical Gardens. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada AN SSSR* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1974, vol. 91, pp. 8–14].

19. Bradshaw W.R.H. The Origins and Dynamics of Native Forest Ecosystems: Background the Use of Exotic Species in Forestry. *Pap. 9th Annu. Meet. Nord. Group Forest Genet. and Free Breed., Hallormsstadur (June 12–16, 96)*. Buvisindi, 1995, no. 9, pp. 7–115.

20. Damian I., Negrutiu F., Florescu Gh. Dinamica cresterii molidului in perioada de vegetatie. *Nout. econ. forest. Univ. Brasov*, 1978, vol. 12, pp. 55–60.

21. Hirvelä H., Hynynen J. Lannoituksen vaikutus männikön kasvuun, latvavanriolhin ja fuu lituhoalittiuteen Lapissa. *Folia Forestalia*, 1990, no. 764, pp. 1–16.

22. Junttila O., Hiede O.M. Shoot and Needle Growth in *Pinus sylvestris* as Related to Temperature in Northern Fennoscandia. *Forest Science*, 1981, vol. 27, iss. 3, pp. 423–430. DOI: [10.1093/forestsience/27.3.423](https://doi.org/10.1093/forestsience/27.3.423)

23. Kellimäki S. A Model for the Relationship between Branch Number and Biomass in *Pinus sylvestris* Crowns and the Effect of Crown Shape and Stand Density on Branch and Stem Biomass. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, vol. 1, iss. 1–4, pp. 455–472. DOI: [10.1080/02827588609382437](https://doi.org/10.1080/02827588609382437)

24. Leikola M. The Influence of Factors on the Diameter Growth of Forest Trees: Auxanometric Study. *Acta Forestalia Fennica*, 1969, vol. 92, art. 7610. DOI: [10.14214/aff.7610](https://doi.org/10.14214/aff.7610)

25. Linderholm H.W. Climatic Influence on Scots Pine Growth on Dry and Wet Soils in the Central Scandinavian Mountains, Interpreted from Tree-Ring Widths. *Silva Fennica*, 2001, vol. 35, no. 4, art. 574, pp. 415–424. DOI: [10.14214/sf.574](https://doi.org/10.14214/sf.574)

26. Micola P. On Variation in Tree Growth and Their Significance to Growth Studies. *Comm. Inst. For. Fenn.*, 1950, no. 38, pp. 126–131.

27. Owens J.N., Molder M., Langer H. Bud Development in *Picea glauca* I. Annual Growth Cycle of Vegetative Buds and Shoot Elongation as They Relate to Date and Temperature Sums. *Canadian Journal of Botany*, 1977, no. 55(21), pp. 2728–2745. DOI: [10.1139/b77-312](https://doi.org/10.1139/b77-312)

28. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröder W.P., Kjellsen T.D. Extreme Low Temperature Tolerance in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, art. 884. DOI: [10.3389/fpls.2015.00884](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00884)

THE EFFECT OF CLIMATIC FACTORS ON THE SEASONAL DEVELOPMENT OF CONIFEROUS FOREST-FORMING SPECIES IN THE TAIGA ZONE (KARELIA)

I.T. Kishchenko, Doctor of Biology, Prof., Corresp. Member of RANH;

ResearcherID: AAC-1083-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1039-1020>

Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: ivanki@karelia.ru

Observations over the seasonal development of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.), Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) had been carried out for 15 years in South Karelia (taiga middle sub-zone). Phenological observations were taken after every 2–3 days. We recorded the time of such phenophases as swelling and bursting of vegetative buds, beginning and ending of shoot

growth, isolation of wintering buds on the shoots, blooming, completion of growth, flowering and defoliation, corking of shoots. The research purpose is to study the similarities and differences in the seasonal development of the forest-forming species of Karelia affected by the main climatic factors. In order to establish the desired correlation we used methods of elementary statistics, correlation and regression analyzes. It was found that the starting dates of the majority of phenophases in the studied species largely depend on air temperature, and to a lesser extent on humidity, precipitation and solar radiation. The relationship between the starting dates of phenophases and the studied climatic factors is straightforward, and its strength depends on the biology of species and specificity of the phenophase itself. Features of development of conifers are largely determined by the state of the environment not only of the current year, but also the previous one. The increase in temperature and humidity, as well as in solar radiation in July of the previous year, significantly accelerate the phenological development of trees of the species studied. The studied species can be arranged according to the degree of resistance to climatic conditions of the taiga zone in the following order: *Picea abies*, *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, and *Larix sibirica*. It has been found that during the seasonal development *Larix sibirica* is the least demanding of air temperature, and the most demanding is *Picea abies*.

For citation: Kishchenko I.T. The Effect of Climatic Factors on the Seasonal Development of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Karelia). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 72–82. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82

Keywords: taiga zone, conifers, spruce, pine, larch, climatic factors, seasonal development, phenology.

Поступила 20.02.19 / Received on February 20, 2019

УДК 630*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-83-92

METHOD FOR TRANSFERRING NON-FOREST COVER TO FOREST COVER LAND USING LANDSAT IMAGERIES

A. Karpov, PhD Intern; ResearcherID: [H-1915-2019](https://orcid.org/0000-0002-9087-8399),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9087-8399>

B. Waske, Doctor of Geography, Prof.

Osnabrück University, Wachsbleiche 27, Osnabruck, 49090, Germany;

e-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com

Satellite data becomes an important tool for monitoring global change in forest cover. Further development of remote sensing technologies creates opportunities for solving more complex problems requiring multi-time analysis of satellite data. Assessment of success reforestation after a disturbance in forest cover is such an important task. The traditional method of an assessment of successful reforestation is laying out the ground plots, which task requires significant time and resources. Fieldworks and transfer of land to forest cover land is carried out according to the method, which is developed by the Federal Agency for Forestry of Russia. This method has various criteria of success reforestation for every region. Arkhangelsk region, Vologda region and Republic of Karelia became the territories for research. Forest vegetation of this region belongs to the taiga zone and is divided into five groups: the area of pre-tundra forests and sparse taiga, northern taiga, middle taiga and south taiga. International forest classification relates this area to boreal forest. The task of transfer land to forest cover land can be optimized by using remote sensing data. This research shows analysis of recovery of the normalized difference vegetation index, the shortwave vegetation index and the normalized burn ratio in the framework of reforestation objects. Field data was collected for every object and this data includes a number of young trees, average height and species composition. Processing of a considerable number of satellite imageries requires significant computing power because of the Google Earth Engine platform using for analysis data. The most suitable index was chosen in the analysis of the obtained data for the development of an automatic method for transfer land to forest cover land. The most suitable index for dividing lands on forest cover and non-forest cover lands is the shortwave vegetation index. Optimal threshold for transferring land is achievement of recovery index of 80 % from initial values before disturbance. The automatic method was developed using unsupervised classification and threshold values of recovery index.

For citation: Karpov A., Waske B. Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 83–92. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-83-92

Funding: This research was undertaken as part of the project “Forest Monitoring in the Arkhangelsk Region, Using Multisensory Remote Sensing Data” funded by the Russian Ministry of Education and Science and the German Academic Exchange Service in the framework of the Michail Lomonosov Programme (project no. AAAA-A19-119020590052-2).

Keywords: land management, forest management, reforestation, Landsat.

Introduction

Land use change is the major driver of global environmental change resulting in loss of biological diversity, changing the global carbon cycle, affecting local climate and the hydrological cycle [15]. Forest cover change is particularly important, as forests can sequester atmospheric carbon and mitigate climate change. While the

tropical domain experienced greater forest loss when compared to other climate domains [10], boreal forests store the largest amount of carbon of all global biomes [14]. Unfortunately, reliable statistics on boreal forest is not necessarily available and existing national scale forest statistics might be incomplete and inconsistent [14]. However, remote sensing systems have the potential to provide spatially distributed and temporally frequent data on forest cover, and offer great opportunities to better understand patterns, processes and underlying causes of forest cover change [1, 12].

Using of multitemporal analysis of the normalized difference vegetation index (NDVI), the shortwave vegetation index (SWVI), the normalized burn ratio (NBR) and components of Tasseled Cap transformations is usual for assessment vegetation cover, but the spectral index values depend on the phenology of vegetation and climatic conditions [6, 7]. Forest recovery after the disturbance has different periods for different climatic zones. This statement is true for boreal forest, which is located in some climatic zones. Achievement of 80 % of the initial value of the spectral index requires a different period for the extremely cold and cold temperature zones for the North American boreal forest region. Multitemporal analysis of several climatic zones requires a definition of a phenological period for each zone [13]. Analysis Tasseled Cap component shows that spectral indices after disturbance can change for three decades in the territory of the North American boreal forest region. The region can be divided into eastern and western boreal forest shield, which has a different type of forest recovery. This fact is related to difference in precipitation, average temperatures and types of soils [5, 7, 12].

The burned severity is an important aspect of forest regeneration after forest fires. The extent of burned severity often divided into five classes: slight, low, medium, high, very high. This extent influences on the time of forest recovery. Therefore, spectral methods, based on difference or division of the values of the spectral indices before and after disturbance, are important for an assessment of the burned areas. For instance, Stand Regrowth Index (SRI) and Relative Regrowth Index (RRI) are based on after- and pre-disturbance of the NDVI values [8, 9, 18].

Method of unmixed spectral analysis is based on a statement that every pixel can include different fraction [11, 19]. These fractions are named endmembers. The endmembers can be vegetation with photosynthesis, vegetation without photosynthesis and bare soil. Fractional Vegetation Cover (FVC) and NDVI are based on correlation of differences of NDVI value of a pixel and average values of bare soil and vegetation [16, 18].

Using the spectral index requires field data for calibration indices for the assessment of reforestation and finding a relationship between a value of the index and real conditions of forest regeneration such as structure of recovered vegetation, number, and tree species per pixel and tree canopy. Comparison of the multitemporal Landsat data and airborne laser scanning (ALS) data defined pixel, which can be considered as a forest area using criteria of the Food and Agriculture Organization (FAO) if the pixel achieves 80 % of the NBR value before disturbance [2, 3, 17].

The practical issue of using satellite imageries for the assessment reforestation is finding the threshold for transfer cutting and burned areas to forest cover land.

Materials

The main research area is the North-Western region of Russia (Fig. 1). It is Arkhangelsk and Vologda regions and the Republic of Karelia. Forests are considered

as northern taiga, moderate taiga and south taiga in this territory. The study region has an average forest cover of 60 % with predominant coniferous species, where major tree cover consists of mature and over-mature stands with low forest stock. Average species composition for the whole Arkhangelsk region is 70 % spruce, 20 % pine and 10 % birch with a small number of aspens. Most of the trial plots are located in Arkhangelsk region.

The studied regions are characterized by the development of the logging industry and large areas of mature and over-mature forest were cut down. Cutting of forest stands takes place in the form of clear and selective cutting.

Also, the north part of Arkhangelsk region belongs to the Arctic land area according to the Russian rules of the land division. According to the data of the State Forest Register of Russia dated on 2016, the Arctic land of Arkhangelsk region included 39,059 mln ha of land suitable for forest cultivation, and 29,765 mln ha or 76 % from land suitable for forest cultivation were cut down.

Main pattern of reforestation for all three regions is regrowth broadleaf species on cutting areas, which has low economical value for logging industry. Reforestation of coniferous species then occurs via change of species. The natural reforestation requires considerable time to restore coniferous forests.

The lack of natural regeneration on the part of cutting areas is caused by insufficient trees undergrowth, removing of trees undergrowth in the process of cutting, the absence of seed trees and adverse climatic conditions. Developed moss cover and forest litter prevent successful seed germination and rooting of seedlings.

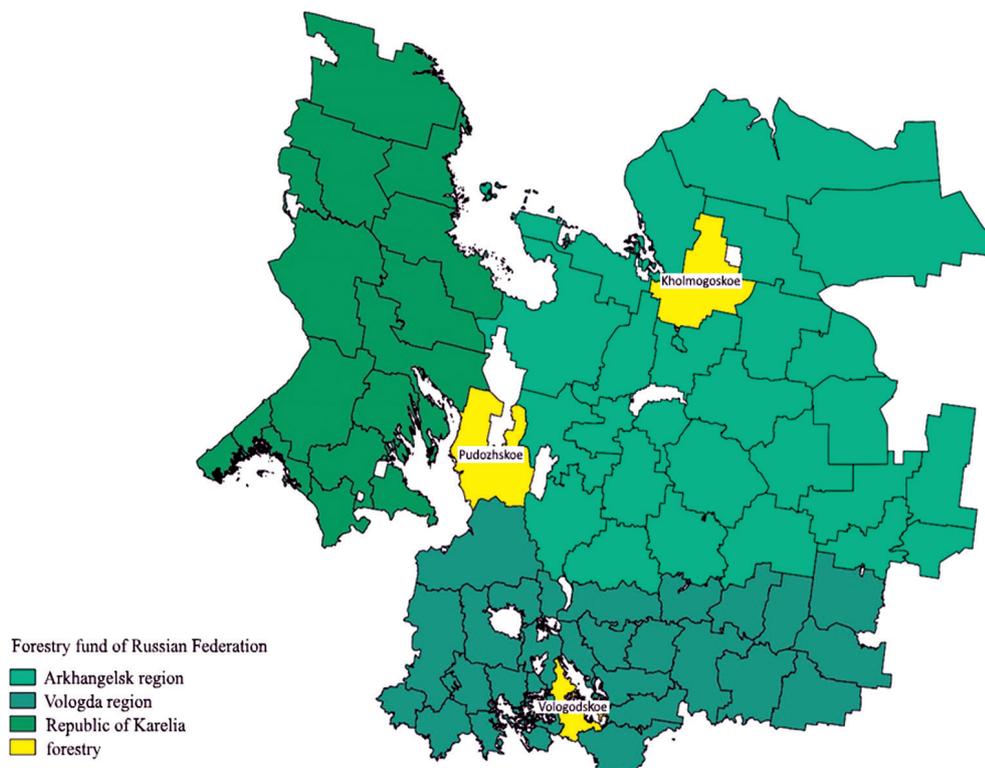


Fig. 1. Regions where trial areas were laid out

Ground plots were made in the period of 2015–2019 (Fig. 1) using spectral characteristic of forest recovery for the analysis. Fieldworks in 2016–2019 were carried out according to the Russian Temporary Procedure of the State Monitoring of Forest Regeneration in 2016 [4].

The ground plot has a square shape with sides equal to 20 m. The amount of young trees divided into groups according to their species and heights is taken into account inside the border of the ground plot. There is one ground plot per 10 ha of cutting area (Fig. 2).

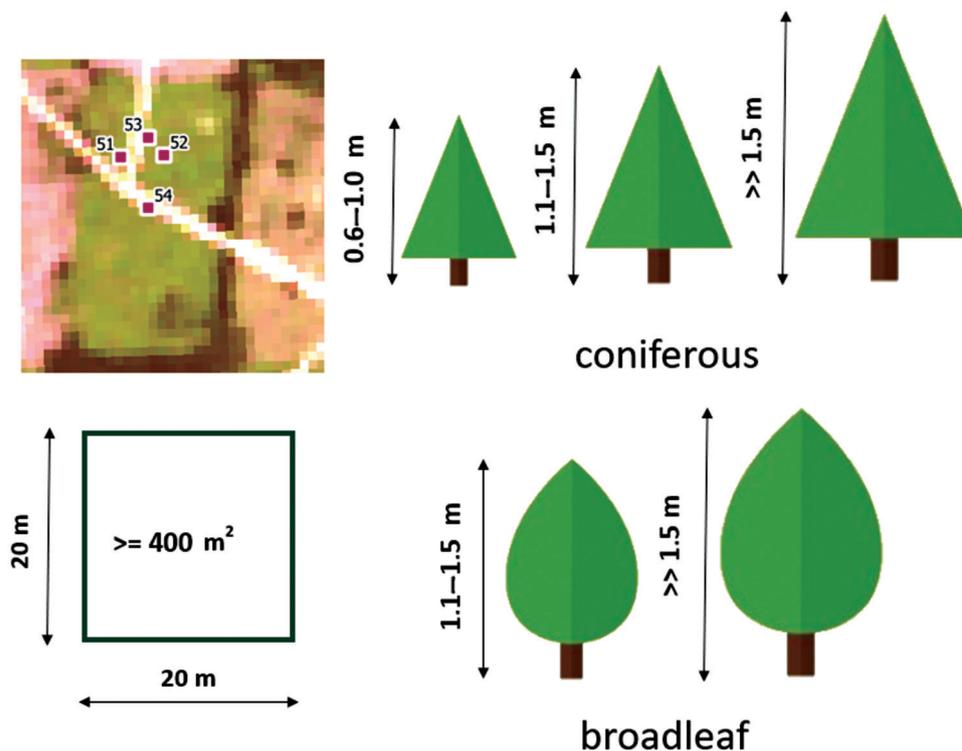


Fig. 2. Methods of creation of ground plots and groups of heights for different groups of tree species

Data of several ground plots on one cutting area are averaged and recorded in the report. The averaged data of the report is used to make a decision to transfer the non-forest cover land to the forest cover land. The procedure of state monitoring defines required conditions such as number, average height of trees and parameters of ground plots for transferring non-forest to forest land (Table).

Conditions for transferring non-forest land to forest land

Tree species	Trees, pcs/ha	Average height, m
Pine	1500	0.7
Spruce	1500	1.0
Birch, aspen, alder	2000	1.5

Almost all the objects on which the ground plots were made have reached the criteria of transfer to forest land during year fieldwork. The number of ground plots was equal to 57.

Satellite imageries of Landsat 5, 7, 8 are used for the analyses of spectral characteristics of the ground plots. These images had atmospheric correction, which was already done in the Google Earth Engine (GEE) collection.

The Global Forest Lost dataset for the period of 2000–2017 was used as a framework for unsupervised classification and tree cover datasets dated on 2000 [7].

High-resolution imageries of Google and Yandex services and Hansen's forest loss dataset were used for drawing the border of cuttings and burned areas.

Methods

The work under the project was divided into several parts: processing of field materials, drawing borders of research objects; analysis of spectral dynamic of NDVI, SWVI, NBR, detection of spectral recovery indices after disturbance (cutting, forest fire) at the moment of field observation; and developing a method for transferring non-forest land to forest land.

Collection of multitemporal values for research objects was carried out using the GEE platform. Research object is cutting or burned areas, where ground plots were done for field observation. Indices were calculated using middle resolution satellite imagery Landsat.

Algorithm for collection index values includes the following steps:

1. Research object is drawn using high resolution satellite imageries. This object can be a forest regeneration area after cutting or a forest fire with a high level of severity.

2. The search of all accessible satellite imageries for each research object. The search has some selection criteria: cloudiness of imagery less than 50 %, the time period of search only summer months (June, July and August). All selected imageries are included in the collection.

3. The boundary of the research object is increased by 1000 m. This area is used for detecting cloudiness pixels. The imagery is excluded from the collection if it has a cloudy pixel in this border.

4. The boundary of the research object is reduced by 30 m. This excludes pixels of forest edge and other objects, which do not belong to the cutting or burning areas.

5. Average values of NDVI, SWVI and NBR are calculated for each research object for each satellite imagery in the collection.

The script including all the steps is available here: <https://code.earthengine.google.com/6ad67cf35ae901ead018832e4482c774>. Average values of multi-time indices are downloaded on personal computer for processing.

Next step is finding the values of indices before disturbance, year of disturbance and field observations. Phenological differences have a significant influence on the values of the indices since the selected indices have to be dated by the close days of the year. The considerable number of research objects did not cover satellite imageries in the year of disturbance. Therefore, only pre-disturbance value and value at the time of the field observations were used in the analysis.

The charts of recovery of NDVI, SWVI and NBR were drawn for the analysis of reforestation on the areas of the research objects (Fig. 3).

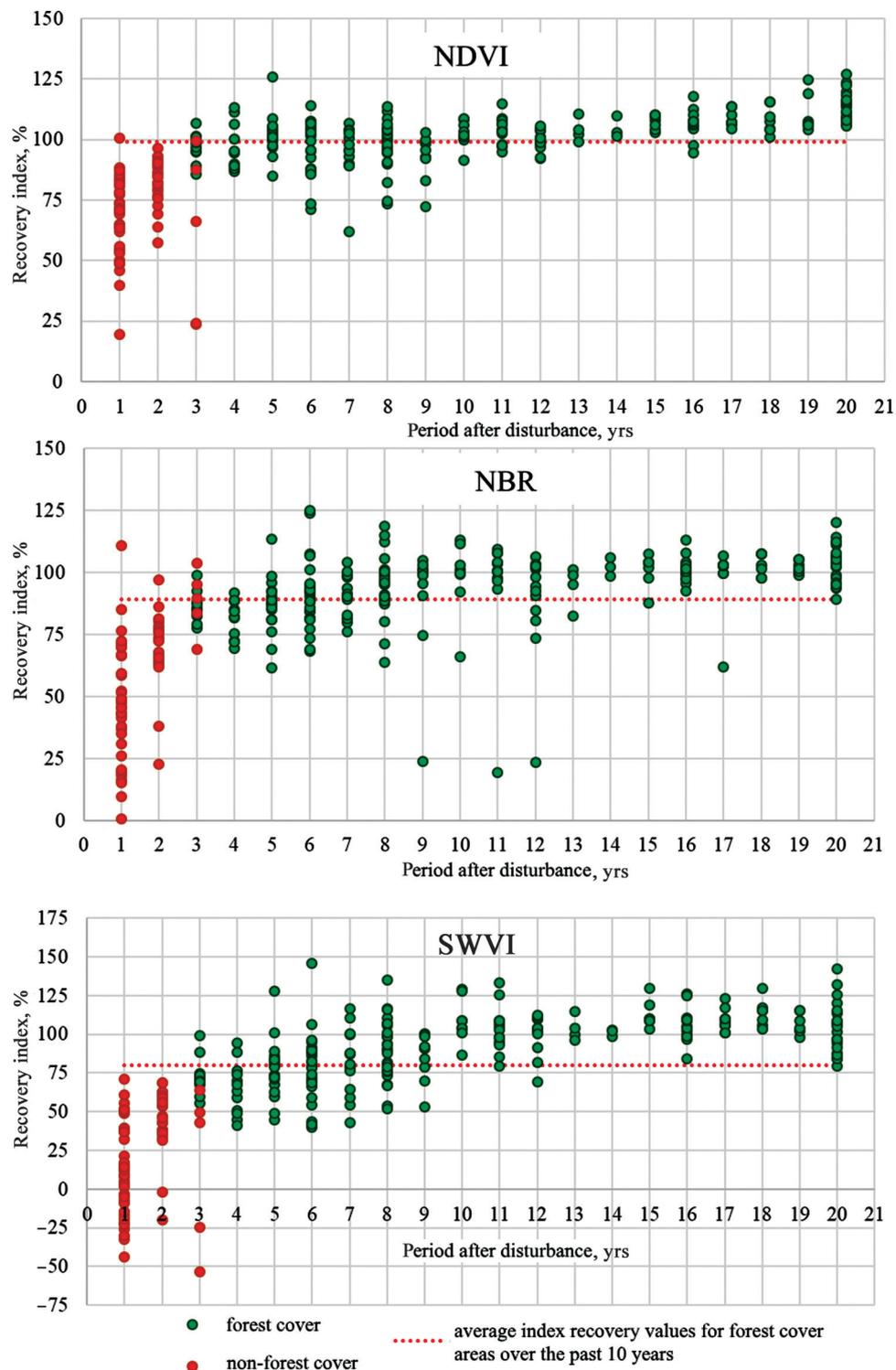


Fig. 3. NDVI, NBR and SWVI recovery indices for each research site

The calculated recovery indices based on NDVI, SWVI, and NBR are indirect measures of forest vegetation restoration and show the degree of reforestation at the studied sites. The indices are shown in Fig. 3, where green is land classified as forest cover land; orange is non-forest cover land. The average values of the recovery index for forest cover land for the past 10 years assigned are displayed as a red line.

We propose to calculate the degree of reforestation (recovery index) as a percentage according to the following formula:

$$R = \frac{I_{obs}}{I_{pre}},$$

where I_{obs} – index at the moment of field observation; I_{pre} – pre-disturbance index.

The recovery index based on NDVI does not show the degree of stand restoration and is not suitable for the land division onto forest cover and non-forest cover lands. Almost, all research objects have values of recovery index over 80 % including the objects with a short period of reforestation (from 1 to 4 years).

The recovery indices based on SWVI and NBR are the most promising, as they clearly show the degree of reforestation in the cutting and burned areas. All research objects in the figures with the recovery indices can be divided into 3 groups: non-forest cover land with the recovery index less than 80 %; forest cover land with the recovery index less than 80 %; forest cover land with the recovery index over 80 %.

Analysis of the chart of the SWVI recovery index shows that research objects have recovery over 80 % after 10 years. A part of the research objects have recovery index from 40 to 80 % in the period from 6 to 9 years. The objects were transferred into forest cover land. The objects, which were not transferred to forest cover land, had the recovery index less than 40 %.

Results

The SWVI recovery index was selected after the analysis of dynamic spectral indices as more suitable for the assessment of land reforestation. An automatic method for transferring non-forest cover to forest cover land was developed based on k-means method of non-supervised classification. Scheme for transfer non-forest to forest cover land is showed in Fig. 4.

The first step is the classification of satellite imagery on 15 clusters in the framework of the Hansen's forest loss layer in the period from 2000 to 2014 [6]. Average SWVI values were calculated for each cluster.

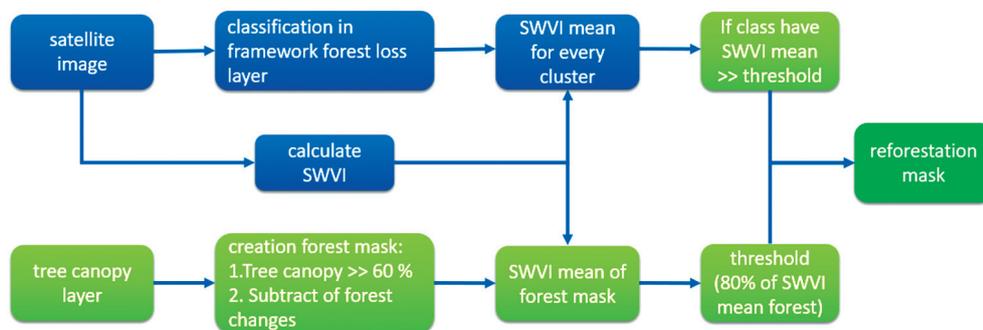


Fig. 4. Scheme for transferring land to forest cover land

The second step is creating forest mask, which includes mature and over-mature forests without disturbances. The forest mask is created using tree cover layer [10] and includes pixels that have canopy equal or more than 60 %. After that, the average SWVI value was calculated for the forest mask and threshold for transferring non-forest cover to forest cover land, which equals 80 % from the average forest mask value.

The third step is comparing the average SWVI value of each cluster with threshold for transferring to forest cover land.

Developed method was applied for imagery of the Landsat 8 satellite with ID: LC08_L1TP_181015_20180719_20180731_01_T1.

Conclusion

Analysis of research objects using remote sensing technology shows the possibility of creating methods for transfer non-forest to forest cover land. Optimal threshold values of recovery SWVI is over 80 % from the initial values before disturbance. Calculation of the initial index value for every pixel is a very difficult task, because initial value of forest was calculated using forest mask, which includes pixels mature and over-mature forest without disturbance.

REFERENCES

1. Аleshko P.A., Алексеева А.А., Шошина К.В., Богданов А.П., Гурьев А.Т. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 87–99. [Aleshko R.A., Alekseeva A.A., Shoshina K.V., Bogdanov A.P., Guriev A.T. Development of the Methodology to Update the Information on a Forest Area Using Satellite Imagery and Small UAVs. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2017, vol. 14, no. 5, pp. 87–99]. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99)
2. Аleshko P.A., Гурьев А.Т., Шошина К.В., Щеников В.С. Разработка методики визуализации и обработки геопространственных данных // Научная визуализация. 2015. № 1. С. 20–29. [Aleshko R.A., Guriev A.T., Shoshina K.V., Schenikov V.S. Development of Methodology for Visualization and Processing of Geospatial Data. *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization], 2015, no. 1, pp. 20–29].
3. Богданов А.П., Карпов А.А., Демина Н.А., Аleshko P.A. Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесопользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 89–100. [Bogdanov A.P., Karpov A.A., Demina N.A., Aleshko R.A. Improving Forest Monitoring by Using Cloud Technologies as an Element of Sustainable Forest Management. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2018, vol. 15, no. 1, pp. 89–100]. DOI: [10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100)
4. Приказ М-ва природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 июня 2016 г. № 375 «Об утверждении Правил лесовосстановления»: Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс». [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation “On the Approval of the Rules of Reforestation” on June 29, 2016 no. 375].
5. Aicardi I., Garbarino M., Lingua A., Lingua E., Marzano R., Piras M. Monitoring Post-Fire Forest Recovery Using Multi-Temporal Digital Surface Models Generated from Different Platforms. *EARSeL eProceedings*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 1–8.
6. Chu T., Guo X., Takeda K. Remote Sensing Approach to Detect Post-Fire Vegetation Regrowth in Siberian Boreal Larch Forest. *Ecological Indicators*, 2016, vol. 62, pp. 32–46. DOI: [10.1016/j.ecolind.2015.11.026](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026)

7. Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. Boreal Shield Forest Disturbance and Recovery Trends Using Landsat Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 170, pp. 317–327. DOI: [10.1016/j.rse.2015.09.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.015)
8. Gauthier M.-M., Barrette M., Tremblay S. Commercial Thinning to Meet Wood Production Objectives and Develop Structural Heterogeneity: A Case Study in the Spruce-Fir Forest, Quebec, Canada. *Forests*, 2015, vol. 6(2), pp. 510–532. DOI: [10.3390/f6020510](https://doi.org/10.3390/f6020510)
9. Gradel A., Ammer C., Ganbaatar B., Nadaldorj O., Dovdondemberel B., Wagner S. On the Effect of Thinning on Tree Growth and Stand Structure of White Birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) and Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in Mongolia. *Forests*, 2017, vol. 8(4), art. 105. DOI: [10.3390/f8040105](https://doi.org/10.3390/f8040105)
10. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, iss. 6160, pp. 850–853. DOI: [10.1126/science.1244693](https://doi.org/10.1126/science.1244693)
11. Keshava N., Mustard J.F. Spectral Unmixing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, vol. 19, iss. 1, pp. 44–57. DOI: [10.1109/79.974727](https://doi.org/10.1109/79.974727)
12. Pickell P.D., Andison D.W., Coops N.C. Characterizations of Anthropogenic Disturbance Patterns in the Mixedwood Boreal Forest of Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 304, pp. 243–253. DOI: [10.1016/j.foreco.2013.04.031](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.04.031)
13. Pickell P.D., Herмосilla T., Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A. Forest Recovery Trends Derived from Landsat Time Series for North American Boreal Forests. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 37, iss. 1, pp. 138–149. DOI: [10.1080/2150704X.2015.1126375](https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1126375)
14. Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-Scale Boreal Forest Cover and Change Mapping Using Landsat Data Composites for European Russia. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, iss. 2, pp. 548–561. DOI: [10.1016/j.rse.2010.10.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.001)
15. Turner B.L., Lambin E.F., Reenberg A. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *PNAS*, 2007, vol. 104(52), pp. 20666–20671. DOI: [10.1073/pnas.0704119104](https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104)
16. Vila J.P.S., Barbosa P. Post-Fire Vegetation Regrowth Detection in the Deiva Marina Region (Liguria-Italy) Using Landsat TM and ETM+ Data. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 75–84. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2009.03.011](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.03.011)
17. White J.C., Saarinen N., Kankare V., Wulder M.A., Herмосilla T., Coops N.C. et al. Confirmation of Post-Harvest Spectral Recovery from Landsat Time Series Using Measures of Forest Cover and Height Derived from Airborne Laser Scanning Data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, vol. 216, pp. 262–275. DOI: [10.1016/j.rse.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.004)
18. Yi K., Tani H., Zhang J., Guo M., Wang X., Zhong G. Long-Term Satellite Detection of Post-Fire Vegetation Trends in Boreal Forests of China. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, iss. 12, pp. 6938–6957. DOI: [10.3390/rs5126938](https://doi.org/10.3390/rs5126938)
19. Zhao F.R., Meng R., Huang C., Zhao M., Zhao F.A., Gong P., Yu L., Zhu Z. Long-Term Post-Disturbance Forest Recovery in the Greater Yellowstone Ecosystem Analyzed Using Landsat Time Series Stack. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8(11), art. 898. DOI: [10.3390/rs8110898](https://doi.org/10.3390/rs8110898)

МЕТОД ОТНЕСЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ К ЗЕМЛЯМ, ЗАНЯТЫМ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ, ПО АЭРОКОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ LANDSAT

А. Карпов, аспирант-стажер; *ResearcherID*: [H-1915-2019](https://orcid.org/0000-0002-9087-8399),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9087-8399>

Б. Васке, д-р геогр. наук, проф.

Оснабрюкский университет, ул. Ваксблайхе, д. 27, Оснабрюк, Германия, 49090;
e-mail: lesnoy.monitoring@gmail.com

Спутниковые данные становятся важным инструментом для мониторинга изменений, происходящих в лесном покрове. Дальнейшее развитие технологий дистанционного зондирования Земли создает возможности для решения более сложных задач, требующих многократного анализа спутниковых данных. Оценка успешности лесовосстановления после возникновения нарушений в лесном покрове является такой задачей. Традиционный метод оценки успешности лесовосстановления – закладка пробных площадей – требует значительных временных затрат и ресурсов. Полевые работы и отнесение земель к землям, занятым лесными насаждениями, через закладку пробных площадей производятся по методике, разработанной Федеральным агентством лесного хозяйства России. Данная методика имеет различные критерии успешного лесовосстановления для каждого региона. Территориями исследования стали Архангельская и Вологодская области, а также Республика Карелия. Растительность данного региона относится к таежной зоне и разделяется на пять групп: районы притундровых лесов и редкостойной тайги, северо-таежный, среднетаежный и южно-таежный районы. Международная классификация относит данные леса к группе бореальных. Использование спутниковых данных позволит оптимизировать мероприятия по отнесению лесных участков к землям, занятым лесными насаждениями. Проведен анализ индексов восстановления NDVI, SWVI и NBR на объектах лесовосстановления. На каждый исследуемый объект получены полевые данные о количестве подроста, средней высоте древостоя и породном составе. Обработка большого количества спутниковых снимков требует значительных вычислительных мощностей, поэтому для проведения анализа использовалась платформа Google Earth Engine. На основе полученных данных выбран наиболее пригодный для создания автоматической методики по переводу земель в лесопокрываемую площадь индекс SWVI как наилучший спектральный индекс для разделения земель на достигшие и не достигшие критериев отнесения к землям, занятым лесными насаждениями. Оптимальным порогом для перевода земель стало достижение 80 % восстановления от первоначальных значений индекса до возникновения нарушений в лесном покрове. Использование метода k -средних и пороговых значений индекса для перевода позволило создать автоматизированную методику.

Для цитирования: Karpov A., Waske B. Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 83–92. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-83-92

Финансирование: Данное исследование проведено в рамках проекта «Мониторинг лесов в Архангельской области с использованием данных мультисенсорного дистанционного зондирования», финансируемого Министерством образования и науки России и Германской службой академических обменов в рамках программы «Михаил Ломоносов» (проект № АААА-А19-119020590052-2).

Ключевые слова: землепользование, лесное хозяйство, лесовосстановление, Landsat.

Поступила 03.04.19 / Received on April 3, 2019

УДК 630*624.9

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-93-105

**ADAPTIVE FOREST MANAGEMENT: CASE STUDY OF SESSILE OAK
(*Quercus petraea* (Matt.) Leibl.) FORESTS ON OZREN MOUNTAIN
OF THE REPUBLIC OF SRPSKA**

Z. Govedar¹, Doctor of Silviculture, Prof.; ResearcherID: [AAH-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

M. Medarević², Doctor of Forest Management, Prof.

¹Faculty of Forestry, University of Banja Luka, Vojvode Stepe Stepanovića Blvd., 75A, Banja Luka, Republic of Srpska, 78000, Bosnia and Herzegovina;

e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org

²Faculty of Forestry, University of Belgrade, Kneza Višeslava, 1, Belgrade, 11000, Republic of Serbia; e-mail: milan.medarevic@sfb.bg.ac.rs

Adaptive management is a basic concept of managing forest ecosystems in the face of increased risks such as climate change. Therefore, there is a need to develop key theories and information on which adaptive forest management is based on. This paper deals with the overview of basic information on adaptive forest management, with particular reference to its importance in relation to examples of sessile oak forests drying and climate change in the Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina. Silviculture of sessile oak forests affected by acute and chronic drying of the trees should be based on the preservation of the complete set of stands and miscibility with black pine on shallow serpentinite and peridotite soils. The paper deals with the possibilities of adaptive management of sessile oak forests and concludes with a description of adaptive management activities.

For citation: Govedar Z., Medarević M. Adaptive Forest Management: Case Study of Sessile Oak (*Quercus petraea* (Matt.) Leibl.) Forests on Ozren Mountain of the Republic of Srpska. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 93–105. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-93-105

Keywords: adaptive forest management, forest drying, sessile oak, climate change.

Introduction

Adaptive management is the monitoring of activities (controls) in order to adapt future plans and strategies to the desired management effects. The first ideas about adaptive management of natural resources are described in the papers of Holling C.S. (1978) and Walters C.J. (1986) [13, 43]. The main causes that influenced the implementation of adaptive forest management are related to basic forestry principles (sustainable development, common social interests, forest functions, forest management goals, obligations of forest users, etc.). The basic three types of adaptive control are reactive, passive and active adaptive control [7, 44]. Reactive management implies that management results are used for subsequent decisions that are expected to lead to improved results and achievement of goals. This form of management evolves from inexperience in management as it takes on all the benefits that come from the application of earlier management systems. Passive adaptive management is based on the prediction of ecosystem response to the earlier activities of the control mechanisms. Passive monitoring and evaluation of management is carried out before the start of management activities and there is no satisfactory control over the response

to the management mechanism as monitoring is not sufficiently represented. The key problem is that in passive management, the answer to the question “was the impact of control mechanisms on the ecosystem caused by a management activity or a natural process?” in passive adaptive management, decisions are made mainly on the basis of quantitative indicators, but insufficient attention is paid to unforeseen events (risks).

Active adaptive management can establish a cause-and-effect relationship between management activities and ecosystem changes based on the monitoring of experiments (“learning from practice”). This model involves the creation of multiple parallel control systems that can be evaluated and compared simultaneously [7], and the system that is most favorable in the current state of the ecosystem is applied. Unlike traditional approaches to resource management, decision-makers in active adaptive management systems are fundamentally changing relationships. According to the EUFORGEN (European Forest Genetic Resources Program), an equal level of decision-making between scientists, managers and the public has been identified in the concept of the so-called. Integrated Adaptive Control [21, 37]. Active adaptive management takes precedence over passive because monitoring is integrated into the management process and decision making in forestry is based on adapting plans to change based on control results. Unforeseen circumstances are continuously monitored during the implementation of the plans. This means that the basic feature of active adaptive management is the monitoring and control of ecosystem responses to management actions. However, it is considered that there are also aggravating circumstances for its application because it is more expensive and complex [43].

Two strategies have been developed within the adaptive management of forest ecosystems [5]. The first relates to the conservation of existing forest structures that can be applied to stands at the end of the production period, stands made of resistant tree species and stands with high environmental and economic value. The second is passive adaptation of forest ecosystems, which can be applied in stands of low ecological and economic importance and with high costs of active adaptation. The third is the active adaptation, which is applied in stands made of species with a pronounced climate tolerance, in stands with a pronounced purpose function and a high risk of threatening factors of biotic and abiotic nature. This paper is based on a case study level to partially influence the transfer of scientific knowledge to the actual conditions of management of oak forests affected by the drying process.

Monitoring and the importance of climate change risk assessment

The development of adaptive management systems is based on monitoring, which determines the effects and takes measures to improve the state of forests [15]. Adaptive management requires information on the response of ecosystems (climate, changes in soil characteristics, occurrence of pests and diseases, etc.) to management mechanisms [10]. Forest ecosystems have a rather large adaptive potential, but risk factors such as fires, pests, diseases and climate change require management measures aimed at maintaining the balance of forest ecosystems [47]. In the context of adaptive management, the most important is the control method of forest management, which, based on additional information, despite the risks, can better determine the system of measures that can achieve the set goal [6]. The basic way of quality monitoring and control of forest management consists in periodic forest inventory, which connects forest management planning with management mechanisms. Forest inventories

for the purpose of development of operational management plans in the Republic of Srpska refer to a period of ten years and the collected data are used for the preparation of forestry bases that are implemented in chronological order by forest management companies. Advantage of adaptive management is that plans are adjusted based on the results of monitoring to new contingencies. Adaptive management in forestry goes through several stages, from defining management problems to analyzing the effects of management and incorporating the results of the analysis into the plan (Fig. 1).

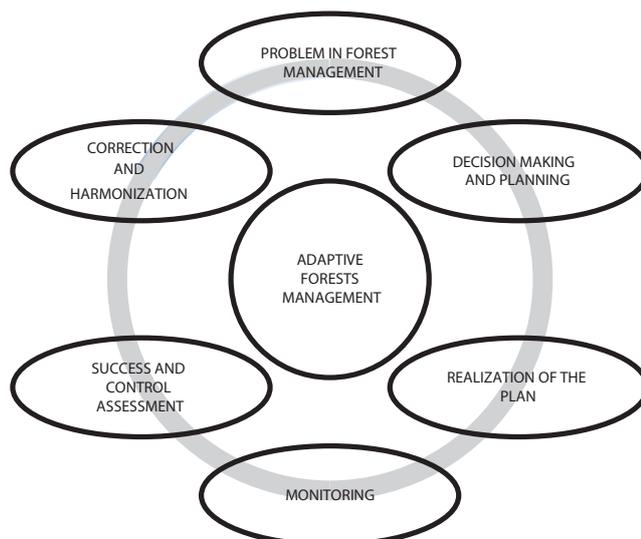


Fig. 1. Phases of adaptive management

Uncertainty in forest management, which can lead to environmental, social and economic losses, is a risk. Management risks are caused by instability of biocenosis and habitat and depend in particular on negative biotic and abiotic influences. In order to reduce the risk in forest management, there was a need to develop management mechanisms that enable the adaptation of forest ecosystems. Climate change is cited as a global problem that complicates forest management risks [27, 35]. Studies show that there is a global warming trend that is reflected in an increase in average temperature by 0.8–1.2 °C since 1900 [11, 26].

Many adverse events in the early 21st century, such as the extreme drought in central Europe in 2003, led to a large decline in the vitality and productivity of forests [8], followed by fires in southern Europe (Portugal, 2003; Greece, 2007) and storms (Germany, 1990 and 1999, France, 1999; Slovakia, 2004; Southern Sweden, 2005; Central Europe, 2007) also destroyed large areas of forests [9, 34]. The destruction of large forest areas due to catastrophic fires affected areas and countries of other continents (Siberia, Brazil and Australia) during 2019. Extensive research worldwide indicates that future disturbances caused by drought, wind and snow will be more severe and temperature local and annual changes will vary greatly [36]. However, it is considered that the climate variable determining wind disturbance (frequency and intensity) will be the most influential in the future. Research has also highlighted the need to analyze the interactional effects of climate change as an incentive for tree mortality, emphasizing the strong dependence on the level of development of biotic disorders. The complexity of interaction disorders complicates predictions of future changes in forest climate in space and time. Risks

in forest management force foresters to accept “avoiding the uncontrolled and managing the inevitable” [4]. However, due to the biological and economic aspects of production, forestry makes it difficult to accurately predict uncertainty, that is, the occurrence of risks.

Significant uncertainties in forest management are caused by: forests heterogeneity; volatility of economic conditions in forestry; fluctuations in natural phenomena (climate change, natural disasters, storm winds, fires, etc.); inadequate risk and impact assessment; lack of preventive measures, etc.

The major problem is that climate change is occurring at a much faster rate than expected [19]. Adaptation of forests to climate change is a basic prerequisite for maintaining the structure, vitality and functioning of European forest ecosystems, including their logging and their importance for carbon sequestration [30]. According to forecasts, temperatures in Europe will increase by 1.0–5.5 °C annually over the next 100 years; global warming is likely to reach 1.5 °C between 2030 and 2052. If temperatures continue to rise at the current rate and the incidence of heat waves longer than 7 days as droughts occur will increase [25]. The temperature in the southern parts of Europe increased by about 3.0 °C in summer compared to the reference time period 1961–1990. In Europe, more frequent and intense rainfall is expected during autumn and winter and summers will be extremely warm and dry. As a result of global climate change over the next 50–100 years, it is assumed in Europe that very harsh and unstable weather conditions can occur [26].

*Adaptive management to prevent forest management risk:
Case Study – Sessile oak forests on Ozren mountain in the Republic of Srpska*

The drying of sessile oak forests in the Republic of Srpska and Serbia was established at the end of the 19th century, and the last major drying, which continues today, began in 1980 [16]. On Ozren mountain in the Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina (BiH) (Fig. 2), over 1.000 ha of the sessile oak forests have been dried. These forests typologically belong to the high sessile oak forests and mixed forests of the sessile oak and black pine (*Pinus nigra* Arn.) on shallow (sometimes deep) eutric brown and distric soils on serpentines and peridotites. The area is located at an altitude of 500 to 800 m.

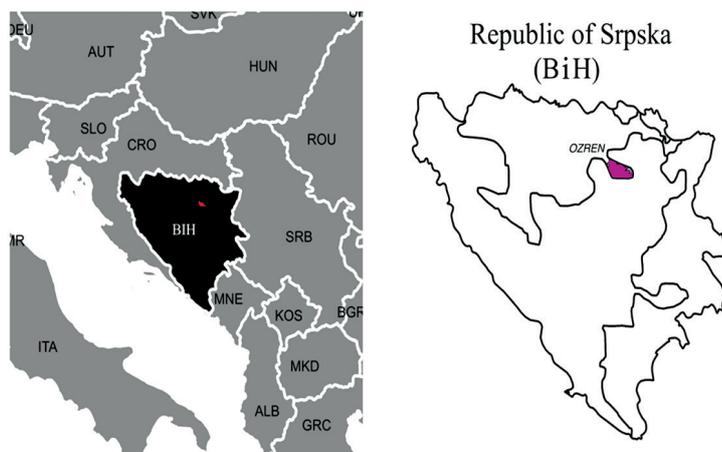


Fig. 2. The geographical location of Ozren Mountain

The drying of the sessile oak forests on Ozren mountain is a consequence of the settlement of damage caused by the intense drought, where shallow soil dominates on serpentinite and peridotite geological ground. The forests of the sessile oak in the Ozren area can be characterised by: insufficient production effects; unfavorable age structure; unsatisfactory health.

Comparing the basic elements of the structure of sessile oak stands affected by the drying process, it can be characterised by decrease of the share of sessile oak in the mixture ratio by 20 %, the current volume increase by an average of 1.0 m³/ha and the stand canopy by 20 %. The productivity of high sessile oak forests in this area is much less than optimal. This is especially true for mature stands where the optimum volume should be around 200 m³/ha [28]. The stands affected by drying are dominated by stands whose mature trees are of 80 to 100 (120) years old and in which, after heavy felling, the stand canopy has been completely “broken” in the previous period, so the yield of acorns is very modest. The largest number of the sessile oak trees on Ozren (over 90 %) is affected by crown drying and defoliation over 80 and 95 % according to the classification system for the vitality assessment of tree crowns [14].

Ozren forests have been exposed to the trend of rising air temperatures for many years (Fig. 3). The analysis of the time series and the trend of temperature changes were performed according to data from the meteorological station in Doboј for the period of 1961–2018.

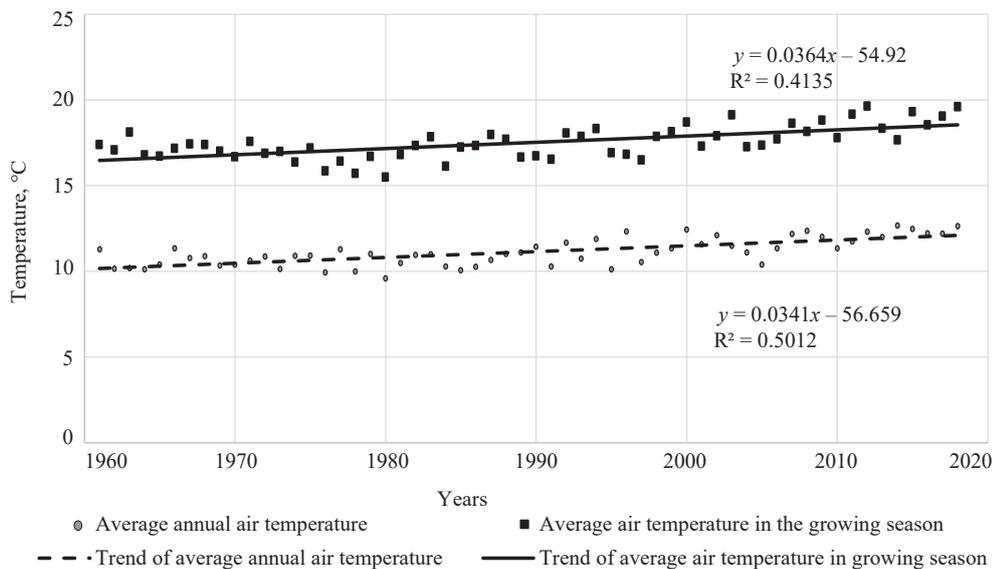


Fig. 3. Average temperature trend in the Doboј area (1961–2018 period)

The annual cumulative trend of rising air temperature averages 1.6 °C. A very high cumulative trend of increasing average absolute maximum air temperatures in the period from 1990 to 2018 was observed, which is as high as 3.8 °C. Also the number of tropical days has been evidently higher in the last decade and ranges on average from 3 to 6 days a year. Analysis of the trend of moving decadal average annual air temperatures over the analyzed period shows a sudden increase in air temperature of 19 decades (Fig. 4).

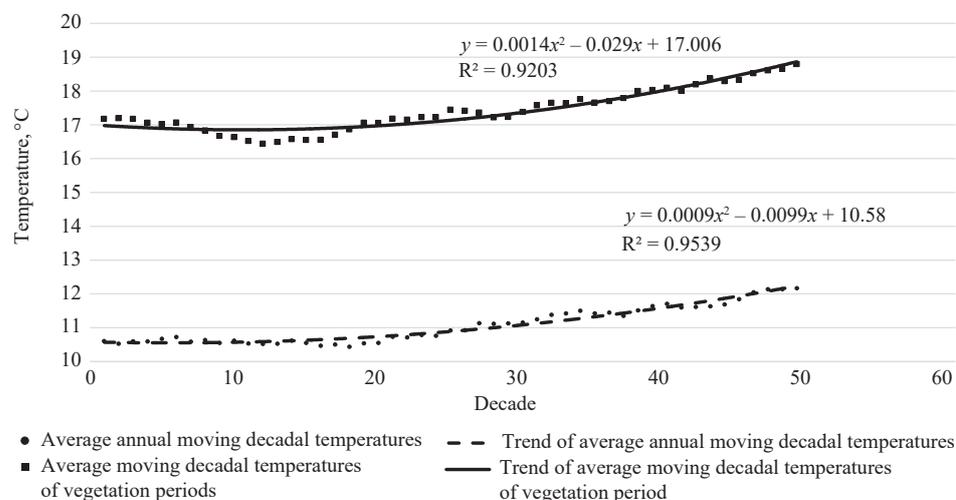


Fig. 4. Trend of average moving decadal temperatures

Continuous runoff during the vegetation period is characteristic for 21 year, and the transitional type of runoff (pronounced exorcism) during the vegetation period is characteristic for 15 years of the series analyzed. Reduced water runoff was during the dry summer months and is typical for 2011. The trend in the flow of this drought index for the growing season shows a decline in values and an increase in the duration of drought in the vegetation period. Using the Preslers drill bit from trees with a pronounced initial phase of crown tip drying, the width of the growth rings was measured using the Coorecorder 7.6 and CDendro 7.6 computer programs. A sinusoidal flow of the latitude line was observed (Fig. 5), with two periods of intense decline in latitude annual rings (the first period from 1961 to 1980 and the second significantly more pronounced from 2010 to the end of the analyzed period). These dry periods caused the acute and chronic form of drying of oak. The acute form results in a very intense drying process that begins and ends in a single season. The chronic form is a long process in which the trees dry gradually and the process usually begins with the appearance of dryness which gradually spreads and engulfs the entire crown.

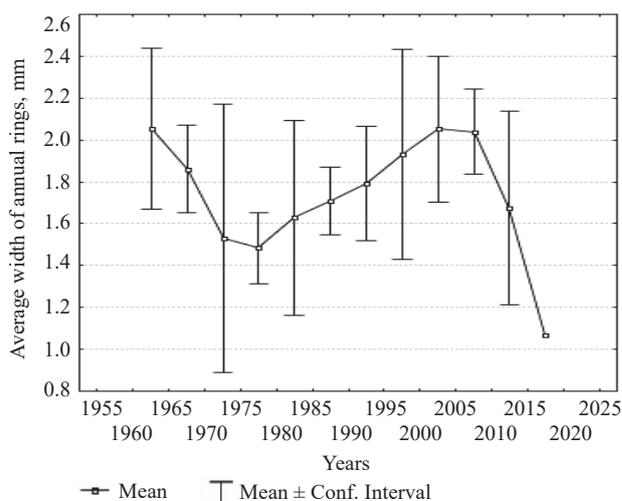


Fig. 5. Average width of annuals of sessile oak trees in the initial stage of drying

Climate can be considered as a first-degree sudden factor that paves the way for the arrival of other factors leading to the sessile oak forests [16]. Climate change, followed by pathogenic organisms and defoliators, have the greatest impact on decaying of sessile oak forests [32]. These factors can be attributed to inadequate silviculture practices as well as the assumption that there is a significant participation of mature stands in the sessile oak forests on Ozren mountain in the Republic Srpska.

Another problem in forestry is the slow and relatively low adaptability of the sessile oak forests under new climate change conditions, as well as lack of precise information on the degree of threat and degree of risk of individual forest communities. Namely, after severe droughts on relatively large areas on Ozren mountain, all communities do not respond in the same way because their sensitivity is different. The risks of forest management (e.g. “multiple stress”) and the long-term nature of the production process complicate the effects of silviculture, especially on areas that need to be rehabilitated after the drying of forests. There are at least three factors of climate change that trees need to adapt to: temperature increases, increased carbon dioxide concentrations, and increased nitrate deposition. Therefore, silviculture has a special importance and a preventive role in forest protection [22, 23]. However, targeted silviculture practices can be very useful in reducing the risk of forests management. If inadequate silviculture practices create favorable conditions for the development of pests and diseases, we reduce the vitality of forests, which may, for example, encourage the gradation of some insects [3, 31, 36, 45, 46], such as *Lymantria dispar* in deciduous forests [12]. Most pathogenic fungi of temperate forests require temperatures between 20 and 30 °C for optimal mycelial growth [40].

Soil moisture deficiency increases the possibility of fire, as well as water supply and soil temperature in the interconnection create conditions for harmless saprophytic organisms or, conversely, for dangerous pathogens. Also, the degree of adaptation of trees to soil structure, acidity and nutrient availability may affect the success of natural regeneration in conditions where the forest is threatened by drought. The need for adaptive silviculture practices of forests that are threatened by drought is increasingly expressed today. Young stands now formed by afforestation or occurring after natural regeneration usually have a production period that overlaps with climate change scenarios from 2070 to 2100. These stands will be exposed to the drastic risks that await them over a lifetime. According to the scenarios and models presented in the third national report on climate change in the Republic of Srpska, BiH [42], the trend of increasing the average annual air temperature by 2030 compared to the base period 1961–1990 will be up to 1.0 °C. It also envisages a reduction in the area under forests and a reduction in the average annual CO₂ storage capacity, partly due to the drying up of forests. The highest increase in air temperature is expected in summer (up to 1.4 °C). In the period from 2071 to 2100, according to the scenario A2, a rapid increase in temperature is expected, up to 4 °C annually and up to 4.8 °C in summer. CO₂ emission by population in the Republic of Srpska (BiH) is 5.18 t/yr, which is slightly more than half of the European average (9.93 t/yr per capita). If the CO₂ content in the air is greater than 0.05 %, the intensity of photosynthesis decreases, the plants are physiologically weak and the productivity of the trees decreases [17]. It is assumed that an increase in air temperature by about 3.0 °C leaves forest vegetation with a similar consequence as the shift of vegetation altitude by 500 m above sea level. Most climate models predict major changes within the forest range. Species with small habitats will be particularly endangered, and climate

extremes will be a major problem for limiting habitats of many species. This will especially affect species with a narrow ecological valence. The most threatened will be the xerothermal and continental areas where the sessile oak forests are located. The greater the difference between the current species composition and future forest types that future natural vegetation will make, the more intensive forest management practices will be required [21, 23].

In such circumstances, there is a need to develop adaptive forestry management that can provide useful forest functions even in uncertain conditions. Silviculture is facing the most difficult task because, based on the current state and projections of uncertain events and risks, positive effects are expected in the future on services provided by forest ecosystems. One way of adaptive management is to compare the present composition and natural regeneration of species with the expected vulnerability and degree of adaptation of the main tree species in different change scenarios. The second strategy concerns the formation of mixed and uneven-aged stands [12, 25] that have a greater possibility of complementary adaptation to environmental conditions [17, 24, 33]. In addition to adapting to future climates, mixed forests are considered to be superior in terms of economy [17, 18] and ecosystem functioning [2, 17]. Possibilities of creating mixed stands of the sessile oak and black pine in poor serpentinite-peridotite habitats represent one of the adaptive management options. In highly exhausted and erodible terrains in the Ozren area, it is possible to enter black pine artificially. As a pioneer species in these habitats, black pine can create the prerequisites for natural restoration of sessile oak. Adaptive management of the sessile oak forests affected by droughts under the influence of climate change involves monitoring the succession of vegetation and natural regeneration together with black pine. In order to remedy the effects of forest drying, silviculture should be based on maximizing growth and vigor, adapting tree species to habitat conditions and increasing the diversity of endangered stands.

Adaptive silviculture in drought-affected stands in the Ozren area can be classified into the following groups: eliminating the effects of drying; natural and artificial restoration of stands; tending of stands and amelioration of degraded stands; saving economic benefits; preventive protection of stands.

Removal of the consequences of drying should be done by sanitary felling. The surfaces with the highest degree of urgency are treated first. These are areas with very poor tree health. Sanitary felling should remove all the sessile oak trees that are affected by the drying process in the advanced stage (standing dead wood), trees with heavily reduced crowns, then infected and diseased trees. These tree fellings are of preventative importance because they reduce the potential for the harmful factors. It also prevents the emergence of oak bark beetles (*Scolytus* sp.) as it can transmit infection by vascular fungi [20, 41]. If the stand canopy is less than optimal (0.7) and tree mortality is greater than 30 % then there is justification for applying fellings to save economic benefits. Tree marking is simple and involves only dead and dying trees.

To minimize potential negative impacts the adverse factors, we need to implement various prevention and adaptation measures with different timeframes for implementation [1]. Basically, preventive actions can be classified into three main categories: legal, silviculture and direct [22]. The main element of forest management planning under risk conditions is a clear silviculture objective. For forests of productive character (economic forests), the primary goal is to produce the maximum amount of quality timber volume in the shortest possible time while

maintaining optimal habitat potential and at the lowest cost possible. This means that, in practice, the optimal quantity and structure of wood assortments should be ensured by applying operational management plans. Therefore, it is necessary to identify more possibilities for forest management (adaptability of forest management). This would systematically reduce uncertainties and increase the likelihood of success over a relatively long forestry production period. They typically, as well as environmental factors, act as complex and complementary as integrated risks and often lead to offsetting negative effects.

Preventive silviculture practices are the best way to prevent the occurrence of forest drying [7, 29, 38, 39] and they represent a good health status of forests. In order for these practices to open up full effects in management, they must be implemented in even aged stands throughout the production period (rotation). Silviculture effects are most influential when applied several years before health problems occur. Another significant component of preventative methods is sanitary felling. Their application seeks to prevent the cause and duration of damage. However, these measures should be timely because they prevent the occurrence of damage to biotic and abiotic origin. Significantly, forest management measures should be consistent with the underlying function of the forest, depending on its occurrence. The basic problem is that we often don't know the primary cause of a negative phenomenon. Therefore, silviculture practices are not adequate for preventive problem solving and acting in accordance with the risks identified. The structure and resilience of forest stands is greatly influenced by the tree composition of the stands, tending of stands and natural regeneration forests.

Conclusion

Adaptive forests management requires the identification of threatening factors (risks), defining their duration and frequency of occurrence. In addition, it is important to know the cost structure required for preventive and adaptive forest management.

Forest ecosystems have a fairly high adaptive capacity however for developing forest management plans, it is necessary to list potential risks, whether they are harmful and to identify risky deviations from the normal (optimal) state of the forest ecosystem. Adaptability to decision-making depending on the risk of climate change implies a broader range of decisions.

Due to the risk of forests management and their sensitivity, different silviculture practices are recommended depending on the type of pests, diseases, fires, winds, etc.

To reduce the risks of future forest disturbances, a stronger understanding of the relationship between silviculture, the likelihood of risk occurrence, and the sensitivity of forest ecosystems is needed. It is necessary to adhere to modern principles of the close to nature silviculture and adaptive forests management. Due to the ecologically negative effects of drying that threaten the complete disappearance of the oak sessile stands, it is necessary to remediate the surfaces in accordance with the activities foreseen for emergency situations in the field. The silviculture practices in the Ozren mountain area should be aimed at preserving the stand structure and creating mixed stands with black pine on the geological base of serpentine and peridotite. Afforestation of difficult terrain, such as often natural sessile oak habitats, will be increasingly complex and difficult, and will require adaptability of species and genotypes introduced to remedy the effects of drying sessile oak forests. In an economically

difficult conditions, timely and preventative silviculture practices should play a major role in reducing the risks associated with adaptive forest management. One of the main tasks for adaptive management is the maintenance and development of such forests, which are adapted to the integrated risks. Dynamic monitoring, inventory and control of forest management is required for the sustainable development of forestry and the successful implementation of adaptive forest management.

REFERENCES

1. Семёнов М.А., Высоцкий А.А., Пащенко В.И. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 57–69. [Semenov M.A., Vysotskiy A.A., Pashchenko V.I. Adaptation Scenarios in Forest Management Due to the Possible Climate Changes. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 57–69]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.5.57](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/fea/57_69.pdf
2. Ammer C., Bickel E., Kölling C. Converting Norway Spruce Stands with Beech – A Review on Arguments and Techniques. *Austrian Journal of Forest Science*, 2008, vol. 125(1), pp. 3–26.
3. Baier P., Pennerstorfer J., Schopf A. PHENIPS – A Comprehensive Phenology Model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a Tool for Hazard Rating of Bark Beetle Infestation. *Forest Ecology and Management*, 2007, vol. 249, iss. 3, pp. 171–186. DOI: [10.1016/j.foreco.2007.05.020](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.020)
4. Bierbaum R.M., Holdren J.P., MacCracken M.C., Moss R.H., Raven P.H. *Confronting Climate Change: Avoiding the Unmanageable and Managing the Unavoidable*. Washington, DC, SIGMA Xi, 2007. 144 p.
5. Bolte A., Ammer Ch., Löf M., Nabuurs G.-J., Schall P., Spathelf P. Adaptive Forest Management: A Prerequisite for Sustainable Forestry in the Face of Climate Change. *Sustainable Forest Management in a Changing World*. Ed. by P. Spathelf. Dordrecht, Springer, 2010, pp. 115–139. DOI: [10.1007/978-90-481-3301-7_8](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3301-7_8)
6. Bončina A. *Urejanje gozdov* [Forest Management]. Biotehniška Fakultata v Ljubljani, Slovenija, 2007.
7. Bormann B.T., Martin J.R., Wagner F.H., Wood G.W., Alegria J., Cunningham P.G. et al. Adaptive Management. *Ecological Stewardship: A Common Reference for Ecosystem Management*. Ed. by N.C. Johnson, A.J. Malk, W.T. Sexton, R. Szaro. Oxford, UK, Elsevier Science, 1999, pp. 505–534.
8. Ciais Ph., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V. et al. Europe-Wide Reduction in Primary Productivity Caused by the Heat and Drought in 2003. *Nature*, 2005, vol. 437, pp. 529–533. DOI: [10.1038/nature03972](https://doi.org/10.1038/nature03972)
9. Dobbertin M., DeVries W. Interactions between Climate Change and Forest Ecosystems. *Forest Ecosystems in a Changing Environment: Identifying Future Monitoring and Research Needs. Report and Recommendations of the COST Strategic Workshop, March 11–13, 2008, Istanbul, Turkey*. Ed. by R. Fischer. Germany, 2008, pp. 8–11.
10. Gunderson L.H., Holling C.S., Light S.S. Barriers Broken and Bridges Built: A Synthesis. *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institutions*. Ed. by L.H. Gunderson, C.S. Hollin, S.S. Light. New York, Columbia University Press, 1995, pp. 489–532.
11. Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D.W., Medina-Elizade M. Global Temperature Change. *PNAS*, 2006, vol. 103(39), pp. 14288–14293. DOI: [10.1073/pnas.0606291103](https://doi.org/10.1073/pnas.0606291103)
12. Hlásny T., Turčáni M. Insect Pests as Climate Change Driven Disturbances in Forest Ecosystems. *Bioclimatology and Natural Hazards*. Ed. by K. Střelcová, C. Mátyás, A. Kleidon, M. Lapin, F. Matejka, M. Blaženc et al. Dordrecht, Springer, 2009, pp. 165–177. DOI: [10.1007/978-1-4020-8876-6_15](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8876-6_15)

13. Holling C.S. *Adaptive Environmental Assessment and Management*. Chichester, John Wiley & Sons, 1978. 377 p.
14. Innes J.L. Methods to Estimate Forest Health. *Silva Fennica*, 1993, vol. 27, no. 2, pp. 145–157. DOI: [10.14214/sf.a15668](https://doi.org/10.14214/sf.a15668)
15. Irrgang S. Klimaänderung und Waldentwicklung in Sachsen – Auswirkungen auf die Forstwirtschaft. *Forstarchiv* 4, 2002, B. 73, S. 137–148.
16. Karadžić D. Klimatske promene i njihov potencijalni uticaj na prouzrokovaoče bolesti šumskog drveća i žbunja [Climate Change and Its Potential Impact on Pathogens of Forest Trees and Shrubs]. *Šume i promena klime: Zbornik radova* [Forests and Climate Change: Proceedings]. Ed. by R. Kadović, M. Medarević. Beograd, Univerzitet u Beogradu, 2007.
17. Kimmins J.P. *Forest Ecology*. New York, Macmillan, 1987. 531 p.
18. Knoke T., Ammer C., Stimm B., Mosandl R. Admixing Broadleaved to Coniferous Tree Species: A Review on Yield, Ecological Stability and Economics. *European Journal of Forest Research*, 2008, vol. 127, pp. 89–101. DOI: [10.1007/s10342-007-0186-2](https://doi.org/10.1007/s10342-007-0186-2)
19. Knoke T., Stimm B., Ammer C., Moog M. Mixed Forests Reconsidered: A Forest Economics Contribution on an Ecological Concept. *Forest Ecology and Management*, 2005, vol. 213, iss. 1-3, pp. 102–116. DOI: [10.1016/j.foreco.2005.03.043](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.043)
20. Koskela J., Buc A., Teissier DuCros E. *Climate Change and Forest Genetic Diversity: Implications for Sustainable Forest Management in Europe*. Rome, Biodiversity International, 2007. 111 p.
21. Krstić M., Stojanović Lj., Karadžić D. Uzgojne mere u funkciji saniranja stanja i zaštite od propadanja sušenjem ugroženih mladih kitnjakovih šuma [Silviculture in the Function of Rehabilitation and Protection against Decay by Drying Endangered Young Sessile Oak Forests]. *Šumarstvo* [Forestry], 1995, br. 1-2, str. 3–11.
22. Kusel J., Doak S.C., Carpenter S., Sturtevant V.E. The Role of the Public in Adaptive Ecosystem Management. *Sierra Nevada Ecosystem Project: Final Report to Congress, vol. II, Assessments and Scientific Basis for Management Options*. Davis, University of California, 1996, pp. 611–624.
23. Lazarev V. Primena mera zaštite u oboljelim objektima [Application of Protective Measure Steps in Diseased Forest Objects]. *Glasnik Šumarskog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci* [Bulletin Faculty of Forestry, University of Banja Luka], 2006, br. 5, str. 37–63.
24. Lexer M.J., Hönninger K., Scheifinger H., Matulla C., Groll N., Kromp-Kolb H., Schadauer K., Starlinger F., Englisch M. The Sensitivity of Austrian Forests to Scenarios of Climatic Change: A Large-Scale Risk Assessment Based on a Modified Gap Model and Inventory Data. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 162, iss. 1, pp. 53–72. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00050-6)
25. Lüdge W. Der Einfluß von Laubholzunterbau auf die Schädlingsdichte in den Kiefernbeständen der Schwetzingen Hardt. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 1971, vol. 142, pp. 173–178.
26. Lüpke B. Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau: Ein Spannungsfeld. *Forstarchiv*, 2004, vol. 75, pp. 43–50.
27. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner, H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R. et al. *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Geneva, World Meteorological Organization, 2018. 562 p.
28. Matić V. *Prirast i prinosi šuma* [Forest Growth and Yield]. Sarajevo, Šumarski fakultet u Sarajevu, 1980. 311 p.
29. Medarević M., Banković S., Šljukić B., Sviličić A. Održivo upravljanje šumama – šumski biodiverzitet i promena klime [Sustainable Forest Management – Forest Biodiversity and Climate Change]. *Šume i promena klime: Zbornik radova* [Forests and Climate Change:

Proceedings]. Ed. by R. Kadović, M. Medarević. Beograd, Univerzitet u Beogradu, 2007, str. 125–152.

30. Milin Ž., Stojanović Lj., Krstić M. Predlog gazdinskih mera za saniranje posledica sušenja kitnjakovih šuma u severoistočnoj Srbiji [Proposal of Land Management Measures for the Rehabilitation of the Drying of Silt Forests in Northeastern Serbia]. *Šumarstvo* [Forestry], 1987, br. 5, str. 154–157.

31. Nabuurs G.J., Masera O. Forestry. *Mitigation Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. by B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer. Cambridge, Cambridge University Press, 2007, pp. 541–584.

32. Netherer S. *Modelling of Bark Beetle Development and of Site- and Stand-Related Predisposition to Ips typographus (L.) (Coleoptera; Scolytidae)*. A Contribution to Risk Assessment. PhD Thesis. Vienna, University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), 2003.

33. Oszako T. Oak Declines in Europe's Forest – History, Causes and Hypothesis. *Recent Advances on Oak Health in Europe. Selected Papers from a Conference Held in Warsaw, November 22–24, 1999*. Warsaw, Forest Research Institute, 2000, pp. 11–40.

34. Pretzsch H. Diversität und Produktivität von Wäldern. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 2003, vol. 174, pp. 88–98.

35. Schelhaas M.J., Nabuurs G.-J., Schuck A. Natural Disturbances in the European Forests in the 19th and 20th Centuries. *Global Change Biology*, 2003, vol. 9, iss. 11, pp. 1620–1633. DOI: [10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x)

36. Schlyter P., Stjernquist I., Barring L., Jönsson A.M., Nilsson C. Assessment of the Impacts of Climate Change and Weather Extremes on Boreal Forests in Northern Europe, Focusing on Norway Spruce. *Climate Research*, 2006, vol. 31, no. 1, pp. 75–84. DOI: [10.3354/cr031075](https://doi.org/10.3354/cr031075)

37. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G. et al. Forest Disturbances under Climate Change. *Nature Climate Change*, 2017, vol. 7, pp. 395–402. DOI: [10.1038/NCLIMATE3303](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3303)

38. Spathelf P., Stanturf J., Kleine M., Jandl R., Chiatante D., Bolte A. Adaptive Measures: Integrating Adaptive Forest Management and Forest Landscape Restoration. *Annals of Forest Science*, 2018, vol. 75, art. 55. DOI: [10.1007/s13595-018-0736-4](https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4)

39. Stojanović Lj., Karadžić D., Krstić M. Istraživanje uzroka sušenja kitnjakovih šuma na području regiona Zaječar i predlog uzgojnih mera za otklanjanje posledica i unapređenje stanja [Investigation of the Causes of Drying of Siltstones in the Region of Zajecar and Proposal of Breeding Measures for Elimination of Consequences and Improvement of the Condition]. *Čovek i životna sredina* [Man and the Environment], 1989, br. 2-3, str. 88–94.

40. Stojanović Lj., Krstić M. Problemi gajenja šuma sa aspekta sušenja hrasta kitnjaka [Problems of Silviculture from the Aspect of Drying Oak]. *Simpozijum "Epidemijsko sušenje hrasta kitnjaka u severoistočnoj Srbiji", 21–22.11.1991: zbornik radova* [Symposium "Epidemic Drying of Sessile Oak in Northeastern Serbia", 21–22.11.1991: Proceedings]. Donji Milenovac, 1992, str. 25–42.

41. Tainter F.H., Baker F.A. *Principles of Forest Pathology*. New York, John Wiley & Sons, 1996. 832 p.

42. *Third National Communication and Second Biennial Update Report on Greenhouse Gas Emissions of Bosnia and Herzegovina*. UNFCCC, 2016. 256 p.

43. Walters C.J. *Adaptive Management of Renewable Resources*. New York, MacMillan, 1986. 374 p.

44. Walters C.J. Challenges in Adaptive Management of Riparian and Coastal Ecosystems. *Conservation Ecology*, 1997, vol. 1, no. 2, art. 1.

45. Walters C.J., Holling C.S. Large-Scale Management Experiments and Learning by Doing. *Ecology*, 1990, vol. 71, iss. 6, pp. 2060–2068. DOI: [10.2307/1938620](https://doi.org/10.2307/1938620)

46. Wermelinger B. Ecology and Management of the Spruce Bark Beetle *Ips typographus* – A Review of Recent Research. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 202, iss. 1–3, pp. 67–82. DOI: [10.1016/j.foreco.2004.07.018](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.018)

47. Yousefpour R., Didion M., Jacobsen J.B., Meilby H.M., Hengeveld G., Schelhas M.J., Thorsen B.J. Modelling of Adaptation to Climate Change and Decision-Makers Behaviours for the Veluwe Forest Area in the Netherlands. *Forest Policy and Economics*, 2015, vol. 54, pp. 1–10. DOI: [10.1016/j.forpol.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.02.002)

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ: НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОВ СКАЛЬНОГО ДУБА (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) ГОРЫ ОЗРЕН РЕСПУБЛИКИ СЕРБСКОЙ

З. Говедар¹, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAH-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

М. Медаревич², д-р с.-х. наук, проф.

¹Факультет лесного хозяйства, Бая-Луцкий университет, б-р воеводы Степе Степановича, д. 75А, г. Бая Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина, 78000;

e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org

²Факультет лесного хозяйства, Белградский университет, ул. Кнеза Вишеслава, д. 1, г. Белград, Сербия, 11000; e-mail: milan.medarevic@sfb.bg.ac.rs

Адаптивное управление является основной концепцией управления лесными экосистемами в условиях постоянно изменяющегося климата. В связи с этим, необходимо найти информацию и разработать основные теории, на которых основано адаптивное управление лесным хозяйством. Данная работа дает общее представление об адаптивном лесопользовании в контексте усыхания дубовых лесов и изменения климата в Республике Сербской (Босния и Герцеговина). Разведение лесов скального дуба, подверженных острому и хроническому усыханию, должно основываться на сохранении всех древостоев и способности к произрастанию совместно с черной сосной на неглубоких серпентинитовых и перидотитовых почвах. В статье рассматриваются возможности адаптивного управления лесами скального дуба и дается характеристика мероприятий по адаптивному управлению.

Для цитирования: Govedar Z., Medarević M. Adaptive Forest Management: Case Study of Sessile Oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) Forests on Ozren Mountain of the Republic of Srpska // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 93–105. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-3-93-105](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-93-105)

Ключевые слова: адаптивное управление лесным хозяйством, усыхание леса, скальный дуб, изменение климата.

Поступила 02.11.19 / Received on November 2, 2019



УДК 630*383.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-106-116

ПРИМЕНЕНИЕ ЗОЛОПОЛИМЕРНЫХ СМЕСЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ

А.Н. Минаев, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1684-7674>

О.В. Зубова, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6263-4688>

Д.М. Кулик, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4163-3675>

В.В. Силецкий, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3357-533X>

В.И. Луговой, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-5571>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: elenafta@yandex.ru, ok_z19@mail.ru, danil-kulik@mail.ru, lol.spairo@yandex.ru, valentinlugovov@gmail.com

Строительство лесных дорог является одним из приоритетных вопросов лесного комплекса. Недостаточно развитая лесная дорожная сеть не позволяет использовать лесные ресурсы, находящиеся на значительном расстоянии от дорог общего пользования, так как рентабельность лесозаготовки многократно снижается. Расширение инфраструктуры лесных дорог позволит повысить мобильность, а также рентабельность добычи ресурса. Основной причиной запущенного состояния лесной дорожной инфраструктуры является высокая стоимость строительства лесных дорог, которая обусловлена высокой стоимостью дорожно-строительных материалов, а также большими расстояниями их транспортировки. Один из актуальных способов снижения стоимости дорожно-строительных материалов – это использование отходов промышленности. С целью решения данной задачи было проведено исследование для получения слоя дорожной одежды с высокими физико-механическими показателями и сравнительно низкой стоимостью из отходов промышленности. В качестве вяжущего в смеси используется бытовой полиэтилен высокого давления, а заполнителя – зола от сжигания осадка сточных вод. За счет применения пластика в смеси образуется коагуляционно-конденсационная структура, при этом материал характеризуется высокой прочностью и морозостойкостью. Данное исследование обладает научной новизной, так как вопросы адгезии полиэтилена с различными заполнителями мало изучены. За основу смеси были взяты вторично-переработанные полимеры (дробленый полиэтилен, фракция 1,5–2,5 мм) в качестве структурообразующего компонента. Также существовала необходимость добавления материала-заполнителя, его роль сыграла зола, оставшаяся после сжигания осадка сточных вод предприятия «Водоканал». По результатам испытаний был получен материал с показателями прочности при сжатии 170,63–552,08 МПа, модулем упругости от 322,0 до 960,0 МПа, водопоглощением в пределах 1 %, что дает возможность использовать его в лесном дорожном строительстве, в том числе в качестве укрепляющего слоя дорожной одежды лесных дорог на слабых грунтах. Применение полученного материала в лесном дорожном строительстве позволит расширить лесную дорожную инфраструктуру за счет снижения стоимости. Наши исследования показывают, что высокие физико-механические показатели увеличат срок службы лесных дорог, а, следовательно, и срок между капитальными ремонтами – данные аспекты положительно повлияют на рентабельность строительства лесных дорог.

Для цитирования: Минаев А.Н., Зубова О.В., Кулик Д.М., Силецкий В.В., Луговой В.И. Применение золополимерных смесей в строительстве лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 106–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-106-116

Ключевые слова: бытовой полиэтилен высокого давления, зола от сжигания осадка сточных вод, строительство лесных дорог, дорожная конструкция, дорожно-строительный материал.

Введение

Сегодня в России существует проблема доступа к отдаленным лесным ресурсам. Рентабельность лесозаготовки снижается за счет повышения стоимости вывозки сырья вследствие изначально высокой цены 1 пог. м лесной дороги (особенно, если учитывать сложности в виде слабых грунтов). Уменьшение стоимости строительства лесной дороги возможно с помощью замены дорогостоящих компонентов дорожной одежды на инновационные, более дешевые.

Целью научного исследования является получение прочного материала для укрепления лесных автомобильных дорог на слабых грунтах.

На конец 2018 г. 30 % дорог на территории России находятся за чертой удовлетворительного состояния. Данный фактор ухудшает возможность их быстрой прокладки и ремонта.

Существует технология использования переработанных полимерных отходов в качестве добавки-заполнителя в битум при укладке дорожной одежды, разработанная индийской компанией «Plastic Waste Management Ltd.». Смесь пластика, подвергнутого переработке, заменяет 8 % от массовой доли битума и в данном случае является устойчивой за счет добавления стабилизаторов, а получаемое покрытие, имея физико-механические характеристики, не уступающие асфальтобетону, позволяет использовать его в качестве компонента дорожной одежды.

Подобные разработки ведутся и в нашей стране. Компания «Рускомполит» производит плиты из композитных материалов для военно-промышленного комплекса. Данные плиты отличаются высокими прочностными показателями (предельная нагрузка не менее 15 МПа), низкой массой (1 плита весит 80 кг) и хорошими экономическими показателями, поскольку изготавливаются из пластиковых отходов.

Изучение подобных технологий осуществляется и в других странах и компаниях. Повсеместная проблема постепенного истощения ресурсов полезных ископаемых приводит к медленному, но верному росту стоимости строительных материалов. Этот факт на фоне увеличивающегося объема полимерных отходов позволяет утверждать, что подобные технологии – решение обоих аспектов проблемы, являющееся экономически выгодным. На данный момент инициативной группой кафедры промышленного транспорта СПбГЛТУ ведется разработка смеси с использованием вторичных полимеров и отходов производств.

Стоит сказать, что на сегодняшний день применение строительных конструкций из полимерных материалов не регламентировано, поскольку отсутствует большая часть нормативной базы, описывающей технологию использования данных материалов. И хотя это не является препятствием для

задействования полимеров и никаким образом не может запретить их применение в лесном дорожном строительстве, но в будущем, учитывая тенденции к использованию вторично-переработанных отходов, наличие специальной документации (ГОСТы, СНИПы) будет необходимо.

Важность данного исследования подтверждается сравнительным анализом технико-экономических характеристик вышеизложенных решений и решения, представленного в статье. Более низкая себестоимость производства при сохранении физико-механических параметров – единственный способ полезной утилизации потенциально-опасных отходов и, как следствие, улучшения экологии региона и страны в целом. Исходя их преимуществ продукта, описанного в данной статье, можно заключить, какие недоработки присутствовали в предшествующих подобных исследованиях (использующих в своей основе полимерные материалы).

В реалиях сегодняшнего дня в лесозаготовительной отрасли остро стоит проблема рентабельности получения сырья. Этот показатель напрямую зависит от расстояния вывозки продукции и, следовательно, от стоимости устройства лесной дороги, ведущей к месту лесозаготовки.

В то же время в отрасли строительства лесных дорог также существует целый комплекс проблем, коренным образом влияющий на данный вид промышленности. Высокая стоимость материалов и работ по возведению конструкций, недолговечность из-за несоблюдения технологий строительства (просадка дорожного полотна, появление колеиности, разрушение конструкции) – вот далеко не все трудности, возникающие в процессе возведения лесных дорог. Вышеизложенное подчеркивает актуальность запланированного исследования, в связи с этим поставлена цель исследования – создание экономичного и прочного дорожно-строительного материала с использованием отходов промышленности. За счет низкой стоимости создаваемого материала открывается возможность расширить лесную дорожную инфраструктуру, а также увеличить объемы добываемых ресурсов.

В качестве вяжущего в смеси используется бытовой полиэтилен высокого давления, а заполнителя – зола от сжигания осадка сточных вод. За счет применения пластика в смеси образуется коагуляционно-конденсационная структура, при этом материал характеризуется высокой прочностью и морозостойкостью. Данное исследование обладает научной новизной, так как вопросы адгезии полиэтилена с различными заполнителями мало изучены. Взаимодействие золы от сжигания осадка сточных вод с различными вяжущими было изучено в работах Зубовой О.В. и др. [2–6]. Разработками в области применения различных видов золы в строительных материалах занимались Liu Hongjun и др. [16]. Использование пластика в качестве компонента асфальтобетонных смесей рассмотрено в исследованиях Дуниной О.А., Лысянникова А.В., Литвиненко Н.А., Корочкина А.В., Стаханова А.И., Строкина А.С. и др. [1, 7–12], а также в трудах зарубежных авторов, таких как E.S. Ahmadinia, S. Himişlioğlu, I.M. Ion, M. Sulyman, M.E. Tawfik, Shi Yin и др. [13–15, 17–20].

Объекты и методы исследования

На стадии разработки смеси для изготовления материала было изначально принято решение о применении отходов промышленных производств как основных компонентов состава. За основу были взяты вторично-перера-

ботанные полимеры (дробленый полиэтилен, фракция 1,5–2,5 мм) в качестве структурообразующего компонента. Также требовалось добавление материала-заполнителя, его роль сыграла зола, полученная путем сжигания осадка сточных вод ГУП «Водоканал» (Санкт-Петербург). Выбор был сделан по двум причинам. Во-первых, существует необходимость утилизации данных отходов. Утилизация путем дальнейшего использования лучше в сравнении с классическим путем (захоронение на полигонах) уничтожения отходов, потому что объем их получения растет в геометрической прогрессии. Во-вторых, использование этих компонентов является экономически наиболее выгодным, поскольку упраздняются затраты на их закупку.

За основу методики изготовления конечного материала была взята технология получения плит из смеси песка и полимерных материалов (ТУ 5716-001-10651514–2013). Суть данного метода заключается в получении однородной горячей смеси компонентов с ее последующим формованием и прессованием. Исходные компоненты измельчаются в промышленном шредере и механически перемешиваются в сухом холодном виде. Затем полученная смесь поступает в шнекосмесительный аппарат, где происходит ее дальнейшее перемешивание и одновременное нагревание при температуре от 210 до 250 °С. Данный этап необходим для возникновения адгезии в рабочей смеси. После этого рабочая смесь поступает в пресс-форму, где происходит уплотнение и формовка изделия с последующим застыванием. В ходе изготовления опытной серии образцов использовалась аналогичная схема технологических операций.

В результате была получена серия образцов из смеси зола+полиэтилен следующего состава, %: 75+25, 50+50, 70+30, 60+40. Нагревание заранее измельченной и перемешанной смеси происходило в муфельной печи при соблюдении температурного режима от 280 до 320 °С в зависимости от процентного соотношения исходных материалов. Перемешивание получаемой пасты производилось поэтапно, степень адгезии определялась визуально. Далее паста помещалась в пресс-форму диаметром 5 см и ставилась под пресс на 3 мин под давлением 25 МПа. Затем проведены лабораторные испытания прочности и водостойкости получаемого материала.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытания образцов из смеси золы и полиэтилена представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований образцов из смеси зола + полиэтилен в поисковом эксперименте

Номер образца	Соотношение зола/пластик, %	Масса образца m , г	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа	Модуль упругости $E_{упр}$, МПа	Водопоглощение $W_{вп}$, %
1	80/20	137,58	170,63	324,7	0,89
2	60/40	142,60	323,59	409,1	0,49
3	50/50	143,17	364,30	560,8	0,32
4	40/60	142,16	364,25	623,3	0,25
5	20/80	132,47	370,00	789,5	0,18

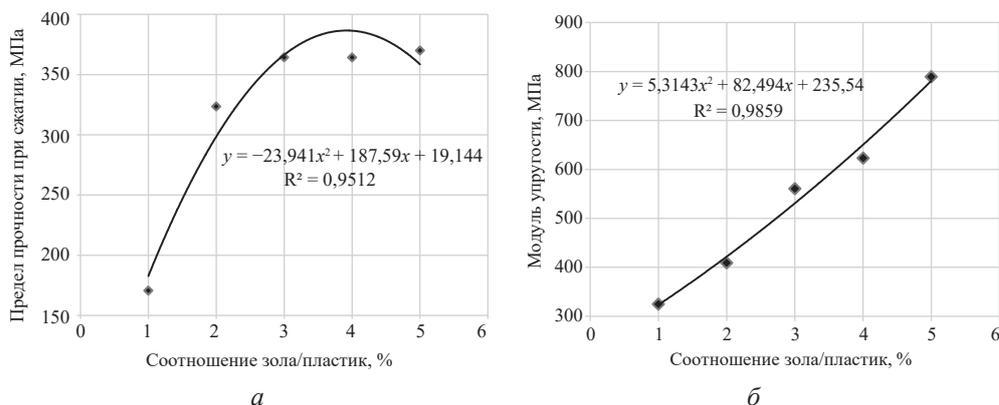


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии (*a*) и модуля упругости (*б*) водонасыщенных образцов из смеси золы и вяжущего от содержания бытового полиэтилена в поисковом эксперименте

Fig. 1. Dependence of the compression resistance (*a*) and the elastic modulus (*б*) of water-saturated samples made of an ash-binder mixture on the household polyethylene content in the pilot experiment

На рис. 1, *a* наблюдается рост предела прочности при сжатии от 170,63 до 370,00 МПа с увеличением процентного содержания полиэтилена в образцах. Пластик, термически обработанный в смеси с золой, образует структурную форму материала, повышая прочность изделий и сохраняя целостность образцов, а зола служит массовым наполнителем, обеспечивая объемную заполняемость материала.

Снижение модуля упругости от 324,7 до 789,5 МПа с уменьшением компонентного содержания золы в образцах (рис. 1, *б*) объясняется тем, что зола, имея мелкозернистую структуру, способствует распределению нагрузки по всей площади образца и проявляет тенденции к восстановлению изначальной формы после снятия нагрузки.

После поискового эксперимента проведены дальнейшие исследования по уточнению оптимальных соотношений компонентов, а также по оптимизации состава смеси. Были изучены смеси зола/полиэтилен следующего состава (при меньшей, чем в поисковом эксперименте, массе образца): 40/60, 50/50, 60/40, 70/30. Также было принято решение об изготовлении образцов с добавлением 10 % битума и проведении с ними дополнительной серии экспериментов. Данное решение имело цель – исследовать технологию изготовления образцов. Для этих серий были выбраны соотношения, предположительно наиболее перспективные для исследований, исходя из физических свойств, проявляемых материалами – компонентами смеси. При определении водопоглощения визуально отмечено отделение золы от образцов (только в тех случаях, где содержание золы превышало 60 %), что свидетельствовало о некотором проценте ее вымываемости из готового материала. Целостность и монолитность (с отсутствием вымываемости золы) получаемых образцов достигались при минимальном содержании полиэтилена: 40 % для серии без добавления битума и 30 % для серии с битумом. Температурный режим печи, время нахождения под прессом и нагрузка при прессовании образцов остались неизменными по сравнению с первой серией опытов. Пресс-формы для изготовления образцов были замене-

ны на пресс-формы с меньшим диаметром – 3,5 см. В то же время количество полиэтилена в образцах, превышающее 60 %, влияло на модуль упругости, снижая его за счет излишней жесткости преобладающего в образцах пластика.

В результате были получены и испытаны (определение аналогичных по сравнению с первым опытом физико-механических показателей) вторая и третья серии образцов. Данные результатов лабораторных испытаний представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

**Результаты лабораторных исследований образцов из смеси зола+полиэтилен;
зола+полиэтилен+битум**

Номер образца	Соотношение зола/пластик; зола/пластик/битум, %	Масса образца m , г	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа	Модуль упругости $E_{упр}$, МПа	Водопоглощение $W_{вп}$, %
1	40/60	56,53	466,29	106,3	0,07
2	50/50	59,80	445,57	192,0	0,10
3	60/40	56,86	484,67	213,3	0,18
4	70/30	55,61	552,08	221,5	0,35
5	30/60/10	58,23	452,90	192,0	0,070
6	45/45/10	55,78	424,60	142,2	0,072
7	60/30/10	59,28	405,67	295,4	0,085
8	70/20/10	57,29	391,50	960,0	0,102

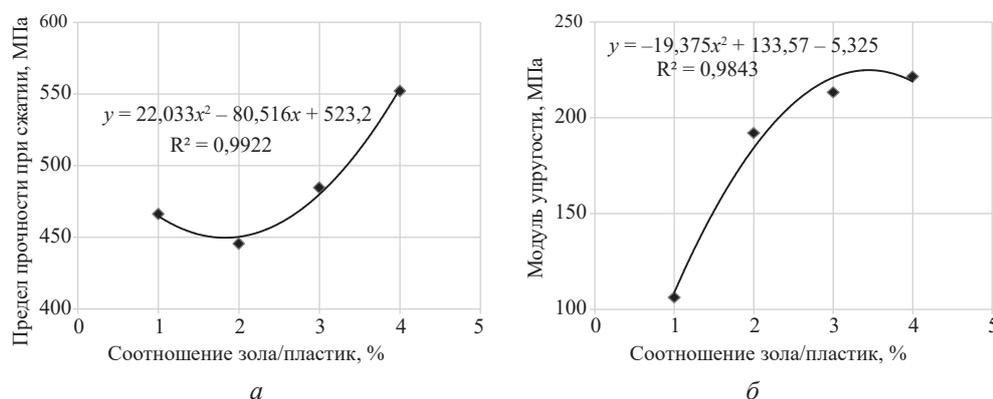


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии (а) и модуля упругости (б) водонасыщенных образцов из смеси золы и вяжущего от содержания бытового полиэтилена

Fig. 2. Dependence of the compression resistance (а) and the elastic modulus (б) of water-saturated samples made of an ash-binder mixture on the household polyethylene content

На рис. 2, а наблюдается уменьшение предела прочности при сжатии от 552,08 до 445,29 МПа в зависимости от повышения процентного содержания золы, выступающей в роли заполнителя. Снижение количества полиэтилена, выполняющего структурообразующую функцию для испытываемого материала, связывающего изначально сыпучую по своей структуре золу и формирующего силовой каркас в структуре получаемого материала, также влияет на предел прочности.

Значения модуля упругости находятся в пределах от 106,3 до 221,5 МПа и возрастают при увеличении процентного содержания золы (рис. 2, б). Зола играет роль заполнителя и препятствует необратимым разрушениям материала

при воздействии механических нагрузок. Однако в данном случае также важны степень адгезии материала и его однородность при формировании образцов под нагрузкой в прессе, поскольку для получения упругого материала необходимо, чтобы амортизирующие свойства золы поддерживались жестким молекулярно-структурным каркасом из полиэтилена. Увеличение показателей упругости в сравнении с первой серией образцов (см. рис. 1, б) обусловлено уменьшением массы образцов и лучшей адгезией при изготовлении.

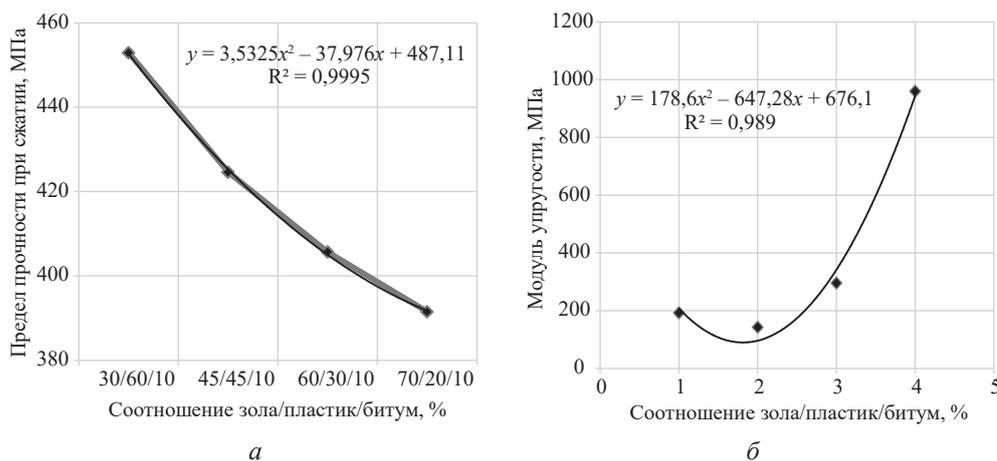


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии (а) и модуля упругости (б) водонасыщенных образцов из смеси золы и вяжущих от содержания бытового полиэтилена и битума

Fig. 3. Dependence of the compression resistance (а) and the elastic modulus (б) of water-saturated samples made of an ash-binder mixture on the household polyethylene and bitumen content

Предел прочности при сжатии образцов уменьшается от 452,90 до 391,50 МПа и напрямую зависит от снижения содержания полиэтилена в образцах (рис. 3, а). Также на уменьшение прочности по сравнению с предыдущей серией образцов влияет наличие битума, создающего коагуляционную структуру, поскольку добавление битума в образцы было обеспечено за счет сокращения количества пластика. Массовая доля золы оставлена без изменений.

На рис. 3, б наблюдается увеличение модуля упругости от 142,2 до 960,0 МПа в зависимости от повышения процентного содержания золы в образцах. Зола, выступая в роли заполнителя, заключенная в структурном каркасе конструкции материала и связанная с пластиком, проявляет способность к равномерному распределению нагрузки на материал, обеспечивая рост упругости. Кроме того, присутствующий в материале образцов битум благодаря своей структуре способствует увеличению показателя модуля упругости по сравнению с образцами предыдущих серий.

Выводы

1. Зола, полученная от сжигания твердого осадка сточных вод ГУП «Водоканал», и полиэтилен высокого давления могут сочетаться как компоненты дорожно-строительного материала.

2. Технология получения рабочей смеси (пасты) основывается на последовательном нагревании и перемешивании компонентов до состояния однородной массы с последующим прессованием и остыванием. Время приготовления смеси в муфельной печи составляет 8–10 мин в зависимости от содержания полиэтилена. Затвердевшая смесь образует монолитную конструкцию. Форма и размеры получаемой продукции вариативны, зависят от пресс-форм, применяемых при прессовании, а также от прилагаемой нагрузки.

3. По результатам испытаний был получен материал с показателями прочности при сжатии 170,63–552,08 МПа, что позволяет использовать его в лесном дорожном строительстве, в том числе в качестве укрепляющего слоя дорожной одежды лесных дорог на слабых грунтах.

4. Экономическая целесообразность применения получаемого материала обеспечивается низкой себестоимостью компонентов, являющихся отходами производств, а также за счет многократности использования изделий.

5. Применение золы от сжигания осадка сточных вод и вторичного полиэтилена высокого давления является целесообразным с экологической точки зрения, поскольку утилизация данных отходов в лесном дорожном строительстве – важный аспект улучшения экологической ситуации в Ленинградской области.

6. Полученный в ходе научной работы материал рекомендуется использовать как укрепляющий слой в конструкции лесной автомобильной дороги. Слой укрепления должен располагаться поверх земляного полотна в качестве дорожной одежды. Укрепляющий слой представляет собой плиты, состоящие из смеси золы от сжигания осадков сточных вод и вторично-переработанного дробленого полиэтилена высокого давления.

7. По окончании эксплуатации дороги плиты возможно демонтировать с целью их повторного использования. При разрушении материала вследствие длительных интенсивных механических нагрузок обломки деформированных плит могут быть переплавлены с последующим формированием новых изделий, готовых к эксплуатации. Таким образом, число использований данного материала неограниченно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дунина О.А., Сайфуллина А.Р., Сахибгареева Л.И. Переработка полиэтилена в пластик и последующее его использование в строительстве дорог // Студент и аграрная наука: материалы X Всерос. студен. науч. конф. Уфа, 22 марта – 23 марта 2016 г. Уфа: Башкир. ГАУ, 2016. С. 189–191. [Dunina O.A., Sayfullina A.R., Sakhibgareyeva L.I. Processing of Polyethylene into Plastic and Its Subsequent Use in Road Construction. *Student and Agricultural Science: Proceedings of the 10th All-Russian Student and Science Conference, Ufa, March 22–23, 2016*. Ufa, BSAU Publ., 2016, pp. 189–191].

2. Зубова О.В. Исследование влияния гранулометрического состава грунтов на прочность зологрунтовой смеси, обработанной цементом // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2012. № 2 (149). С. 118–120. [Zubova O.V. The Study of the Effect of Soil Grading on the Strength of a Cement-Treated Mixture of Ash with Soil. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. Iss. 2. Forest and Woodworking Industry], 2012, no. 2(149), pp. 118–121].

3. Зубова О.В. Использование в лесном дорожном строительстве зологрунтовых смесей, укрепленных вяжущими материалами: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 179 с.

[Zubova O.V. *The Use of Ash-Soil Mixtures Strengthened by Cementing Materials in Forest Road Construction*: Cand. Eng. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2015. 179 p.].

4. Зубова О.В., Бессараб Г.А., Салминен Э.О., Суворова Н.А., Артемьев В.В. Способ устройства конструктивных слоев дорожных одежд на основе золопесчаной смеси вяжущих // Новые строительные материалы: материалы междунар. науч. конф. Труды БГТУ. Минск: БГТУ, 2013. № 1. С. 23–27. [Zubova O.V., Bessarab G.A., Salminen E.O., Suvorova N.A., Artem'yev V.V. The Design Method of Pavement Layers Based on Ash-Soil Mixture of Binders. *New Building Materials: Proceedings of the International Science Conference. Proceedings of BSTU*. Minsk, BSTU Publ., 2013, no. 1, pp. 23–27].

5. Зубова О.В., Бессараб Г.А., Суворова Н.А., Салминен Э.О. Способ устройства конструктивного слоя дорожной одежды на основе золы от сжигания осадков сточных вод. Патент на изобретение № 2471913 Российская Федерация, МПК E01C 3/04, C04B 28/00, C04B 26/26; № 2011110986/03; заявл. 20.03.11; опубл. 10.01.13. [Zubova O.V., Bessarab G.A., Suvorova N.A., Salminen E.O. *Method of Making Pavement Structural Layer Based on Ashes of Effluents Sediments Combustion*. Patent RF no. RU 2471913 C2, 2013].

6. Зубова О.В., Никитина И.С., Анисимова О.И., Новикова А.А. Дорожно-строительный материал на основе зологрунтовой смеси, укрепленной цементом // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. Вып. 201. С. 193–202. [Zubova O.V., Nikitina I.S., Anisimova O.I., Novikova A.A. Road-Building Material on the Basis of a Cinder-and-Dirt Mix Reinforced by Cement. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2012, iss. 201, pp. 193–202].

7. Корочкин А.В. Устройство дорожной одежды. Патент на полезную модель № 88030 Российская Федерация, МПК E01C 5/00; № 2009127004/22; заявл. 15.07.09; опубл. 27.10.09 [Korochkin A.V. *Paving*. Patent RF no. RU 88030 U1, 2009].

8. Литвиненко Н.А., Козырева Е.А. Современные технологии строительства автомобильных дорог // Науч. мысль. 2017. № 2. С. 117–120. [Litvinenko N.A., Kozyreva E.A. Modern Technologies of Road Construction. *Nauchnaya mysl'* [Scientific Thought], 2017, no. 2, pp. 117–120].

9. Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н. Переработанный пластик в дорожном строительстве // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2017. Вып. 7. С. 105–115. [Lysyannikov A.V., Tretiakova E.A., Lysyannikova N.N. Recycled Plastic in Road Construction. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2017, iss. 7, pp. 105–115].

10. Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н. Строительство дорожных покрытий из вторичного сырья // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: материалы междунар. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 07–08 декабря 2017 г. / отв. ред. Э.И. Забнева; ред. кол. Л.С. Кочкина [и др.]. Ульяновск: Зебра, 2017. С. 78–81. [Lysyannikov A.V., Tretiakova E.A., Lysyannikova N.N. Construction of Road Surfaces from Secondary Raw Materials. *Issues of Modern Science: Problems, Trends and Prospects. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, December 7–8, 2017*. Ul'yanovsk, Zebra Publ., 2017, pp. 78–81].

11. Стаханов А.И. Возможности использования полимерных отходов при производстве дорожного покрытия // Актуальные проблемы науки в студенческих исследованиях: сб. материалов IX Всерос. студен. науч.-практ. конф. / Альметьев. фил. Казан. нац. исслед. техн. ун-та им. А.Н. Туполева–КАИ. М., 2019. С. 40–42. [Stakhanov A.I. Potential for Use of Polymer Wastes in the Road Surface Production. *Current Problems of Science in Student Research: Collection of Materials of the 9th All-Russian Student Scientific and Practical Conference*. KNRTU-KAI's Branch in Almet'yevsk. Moscow, 2019, pp. 40–42].

12. Строкин А.С. Повышение сдвигоустойчивости и срока службы дорожных покрытий путем применения асфальтобетона каркасной структуры на модифицированном битуме: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 199 с. [Strokin A.S. *Improving the*

Shear Resistance and Service Life of Pavements by Applying Asphalt Concrete of Frame Structure on Modified Bitumen: Cand. Eng. Sci. Diss. Voronezh, 2009. 199 p.].

13. Ahmadinia Es., Zargar M., Karim M.R., Abdelaziz M., Ahmadinia Eb. Performance Evaluation of Utilization of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) in Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 36, pp. 984–989. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015)

14. Deng Z., Shi F., Yin S., Tuladhar R. Characterisation of Macro Polyolefin Fibre Reinforcement in Concrete through Round Determinate Panel Test. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 121, pp. 229–235. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.05.134](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.134)

15. Hınıslioğlu S., Açar E. Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix. *Materials Letters*, 2004, vol. 58, iss. 3-4, pp. 267–271. DOI: [10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)

16. Hongjun L., Feng Y., Donghai Y. The Strength Varieties of the Subsurface Made of Lime and Fine Coal Ash of the Highway from Changba to Baicheng. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000, iss. 1, pp. 84–85.

17. Ion I.M., Aguiar J.B., Angelescu N., Stanciu D. Properties of Polymer Modified Concrete in Fresh and Hardened State. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 687, pp. 204–212. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.687.204](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.204)

18. Sulyman M., Haponiuk J., Formela K. Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 100–108. DOI: [10.7763/IJESD.2016.V7.749](https://doi.org/10.7763/IJESD.2016.V7.749)

19. Tawfik M.E., Eskander S.B. Polymer Concrete from Marble Wastes and Recycled Poly(Ethylene Terephthalate). *Journal of Elastomers and Plastics*, 2006, vol. 38, iss. 1, pp. 65–79. DOI: [10.1177/0095244306055569](https://doi.org/10.1177/0095244306055569)

20. Yin S. *Development of Recycled Polypropylene Plastic Fibres to Reinforce Concrete*. Doctoral Thesis. Townsville, QLD, Australia, James Cook University, 2017. 137 p. DOI: [10.1007/978-981-10-3719-1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3719-1)

APPLICATION OF ASH-POLYMER MIXTURES IN THE CONSTRUCTION OF FOREST ROADS

A.N. Minaev, Doctor of Engineering, Prof.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1684-7674>

O.V. Zubova, Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6263-4688>

D.M. Kulik, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4163-3675>

V.V. Siletskiy, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3357-533X>

V.I. Lugovov, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-5571>

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: elenafita@yandex.ru, ok_z19@mail.ru, danil-kulik@mail.ru, lol.spairo@yandex.ru, valentinlugovov@gmail.com

The construction of forest roads is one of the priority issues of the forest industry. The underdeveloped forest road network does not allow the use of forest resources, which are situated too far from the civil roads because of lower profitability. Expanding the forest road infrastructure will allow to increase mobility as well as profitability of resource extraction. Forest roads are expensive. This is due to the high cost of road construction materials and long distance of their delivery. One of the latest ways of cost reduction of road construction materials is the use of industrial wastes. A study was carried out in order to obtain a pavement layer with high physical and mechanical properties and a relatively low cost from industrial wastes for the problem solving. Household high-pressure polyethylene is used as a binder in the mixture, and ash from incineration of sewage sludge is used as filler. A coagulation-

condensation structure is formed due to the use of plastic in the mixture; herewith the material is characterized by high strength and frost resistance. The study has a scientific novelty as the issues of polyethylene adhesion with various fillers are poorly known. Recycled polymers (crushed polyethylene, fraction 1.5–2.5 mm) were used as a structure-forming component. Ash from the sewage sludge incineration obtained at the SUE «Vodokanal of St. Petersburg» was used as the filler material. According to the test results, a material with the following parameters was obtained: the compression resistance of 170.63–552.08 MPa, the elastic modulus of 322–1022 MPa, water absorption within 1 %; that allows using the material in the forest road construction. This material can be used as an application for reinforcing the pavement layer in the forest road construction on weak soils. The use of the obtained material in forest road construction will expand the forest road infrastructure by cost reduction. The studies of the Department of Industrial Transport of the Saint-Petersburg State Forest Technical University show that the high physical and mechanical parameters will increase the service life of forest roads and hence the time between overhauls. These aspects have a positive effect on the profitability of the forest road construction.

For citation: Minaev A.N., Zubova O.V., Kulik D.M., Siletskiy V.V., Lugovov V.I. Application of Ash-Polymer Mixtures in the Construction of Forest Roads. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 106–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-106-116

Keywords: household high-pressure polyethylene, ash from incineration of sewage sludge, construction of forest roads, road structure, road construction material.

Поступила 27.06.19 / Received on June 27, 2019

УДК 630*78:62-97/-98

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127

ОБОСНОВАНИЕ НОРМ РАСХОДА ТОПЛИВА МНОГООПЕРАЦИОННЫХ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ПРИМЕРЕ ХАРВЕСТЕРА

К.П. Рукомойников, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

В.О. Купцова, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-0594>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net, vika13244@rambler.ru

Целью исследования являлось обоснование показателей расхода дизельного топлива при осуществлении рубок валочно-сучкорезно-раскряжевочной машиной Silvatec 8266TH на лесных участках Республики Марий Эл. Поставленная цель достигнута путем проведения экспериментальных исследований с использованием объемного метода пополнения бака машины в конце рабочего цикла. Экспериментальные исследования сопровождались фиксацией диаметров вырубаемых деревьев и их объемов. После вырубки каждой из указанных групп деревьев осуществлялась остановка машины, заполнение топливного бака до горловины с точной фиксацией объема заправляемого топлива. Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионную модель, характеризующую средний расход топлива при различных диаметрах вырубаемого древостоя. Анализ найденного решения дал возможность установить, что средний расход топлива харвестера Silvatec 8266TH, работающего на лесных участках учебно-опытного лесхоза Поволжского государственного технологического университета, зависит от среднего диаметра вырубаемых деревьев. Множественный коэффициент детерминации R^2 данной нелинейной модели составил 0,73. Полученная математическая зависимость может быть использована на лесопромышленных предприятиях для приближенного быстрого расчета норм расхода в отсутствие действующих нормативов с целью обоснования объемов списываемого топлива, а также для расчета проектной себестоимости заготавливаемой продукции при организации новых лесопромышленных предприятий и освоении новых лесных участков.

Для цитирования: Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127

Ключевые слова: валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина, лесозаготовка, регрессионная модель, нормы расхода топлива, затраты энергии, сортиментная заготовка.

Введение

В настоящее время в России и за рубежом все большее развитие получает технология машинной заготовки леса с использованием современных многооперационных лесозаготовительных машин (харвестеров) отечественного и импортного производства [2, 9, 11, 15, 17, 19, 25], что говорит об актуальности решения вопросов, связанных с использованием данной техники в России.

В себестоимости заготовленных сортиментов при работе комплекта машин харвестер+форвардер значительную долю затрат (от 46 до 70 %) составляют затраты на топливные ресурсы. Колебания этого показателя обусловлены

наличием лесных участков с различными характеристиками породного состава древостоев, а также существованием ветровальных, заболоченных, низкобонитетных и буреломных лесосек на арендуемых территориях [5]. Удельный расход топлива у харвестеров на рубках главного пользования колеблется в различных природно-производственных условиях лесосек в пределах от 0,493 до 2,87 л/м³ [14].

Распоряжением от 14 марта 2008 г. № АМ-23-р специалистами Минтранса России введены в действие базовые нормы расхода топлива, масла, смазок для разных марок отечественных и зарубежных легковых автомобилей, грузовиков, автобусов. В документе приведены значения базовых, транспортных и эксплуатационных норм расхода топлива для автомобильного подвижного состава, норм расхода топлива на работу специальных автомобилей, порядок применения норм, формулы и методы расчета нормативного расхода топлива при эксплуатации, справочные нормативные данные по расходу смазочных материалов и специальных жидкостей, значения зимних надбавок и др. [16]. Нормы для лесозаготовительной техники в этом распоряжении отсутствуют. Для расчета индивидуальных норм на лесозаготовительную технику необходима своя методика.

Существуют нормы [13], утвержденные приказом Рослесхоза, но в них отсутствуют нормативы на выполнение лесосечных работ при заготовке леса машинным способом. В Белоруссии разработаны нормы расхода топлива на многооперационную лесозаготовительную технику, используемую на лесных предприятиях Республики Беларусь [14], однако данные экспериментальных исследований указывают на возможность значительных расхождений реальных величин расхода топлива в лесах различных районов [5], что вызывает необходимость разработки аналогичных нормативов для лесных участков на территории РФ.

Минфин России рекомендует по транспортным средствам, на которые нормы не установлены, использовать сведения, прописанные в технической документации (письмо Минфина России от 4 мая 2005 г. № 03-03-01-04/1/223), либо руководители предприятий могут вводить в действие своим приказом нормы, разработанные в установленном порядке научными специализированными организациями, осуществляющими разработку таких норм по специальной программе-методике ОАО «НИИАТ». В итоге возникает необходимость обращения в специализированную организацию, которая рассчитывает базовые, транспортные и эксплуатационные нормы в зависимости от условий эксплуатации. Однако профильные организации отказываются проводить подобные расчеты по лесозаготовительной технике, работа которой характеризуется значительным разнообразием условий, мотивируя это тем, что методика ОАО «НИИАТ» предназначена для расчета базовых норм расхода топлива транспортных средств, передвигающихся по дорогам общего пользования, и не предназначена для расчета норм лесозаготовительной и другой техники, которая работает вне дорог общего пользования.

Опыт работы финских лесозаготовительных компаний показывает, что затраты на топливо и ГСМ можно установить путем определения фактических удельных расходов на 1 машино-час в среднем по году за предшествующий период или по нормам расходов отдельных моделей машин при их наличии [20, 26]. Подобные нормативы расхода топлива на большинство современной лесоза-

заготовительной техники, как отечественной, так и зарубежной, в настоящее время отсутствуют, что повышает актуальность рассматриваемой проблемы.

Расход топлива при лесозаготовках имеет экономическое (затраты) [3] и экологическое (вредные выхлопные газы) [22] значение. С учетом объема заготовленной древесины он может варьироваться в зависимости от грунта и условий эксплуатации, навыков водителя, срока эксплуатации техники, нагрузки двигателя в рабочих условиях, частоты вращения двигателя, типа и технических характеристик машины [24].

Все вышесказанное вынуждает лесозаготовительные предприятия, имеющие в своем распоряжении подобную технику, воспользоваться установленной законом РФ возможностью разработки своих (альтернативных рекомендациям Минтранса) норм списания ГСМ и применять их при списании затрат на топливо и составлении сметы затрат в случае их планирования при освоении лесосек последующих периодов.

Объекты и методы исследования

Рациональная организация лесозаготовительных работ состоит в упорядочивании влияния ряда факторов, способствующих снижению расхода топлива и, следовательно, других затрат на эксплуатацию. Расход топлива зависит от взаимодействия природно-производственных факторов. Среди производственных факторов отдельно можно отметить влияние на расход топлива технических особенностей машины, характеристик ее движителя и качества ее обслуживания [4, 18, 10]. Водитель влияет на расход топлива путем использования индивидуального стиля вождения, регулярного повышения квалификации и ухода за техникой [1]. Среди природных факторов выделяют уклон местности, размеры и характеристики древостоя (объем, высота, диаметр) и разнообразие размерных характеристик заготовленной древесины.

Если для машины нет утвержденного Минтрансом норматива либо предприятие решило использовать другое значение, оно вправе рассчитать собственный норматив расхода топлива. Как правило, в такой ситуации организации действуют одним из двух способов.

Первый способ – использование сведений о расходе топлива из технической документации на машину. Однако в большинстве случаев подобная информация либо отсутствует, либо работать с такими показателями невыгодно, так как в документации к машине указывают минимальное потребление топлива при ее использовании в идеальных условиях, которые далеки от реальных.

Второй способ – создание специальной комиссии для осуществления замеров. Простейшим способом измерения расхода топлива машинами и транспортными средствами является объемный метод пополнения бака в конце рабочего цикла, рабочей операции или в конце рабочего дня. Заполнение резервуара осуществляется с помощью измерительного прибора или измерительного пистолета для точных измерений [12, 23].

На рис. 1 представлено изображение харвестера Silvatec 8266TH, использованного в производственных испытаниях с целью обоснования нормативов расхода топлива при выполнении лесосечных работ по валке, обрезке сучьев и раскряжке лесоматериалов в учебно-опытном лесхозе Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ) Республики Марий Эл.



Рис. 1. Харвестер Silvatec 8266TH, использованный при обосновании нормы расхода топлива на валке, обрезке сучьев и раскряжке

Fig. 1. Silvatec 8266TH harvester used to substantiate the fuel consumption rates for felling, cutting branches and slashing

В ходе экспериментальных исследований осуществлялись выборочные рубки в смешанном древостое с преобладанием сосновых деревьев. Заготавливались сортименты длиной 6 м. Стаж операторов харвестера составлял более 3 лет. Лесосеки характеризовались средними грунтовыми условиями с движением по лесосеке и волоку с максимальным погружением колес в грунт не более 100 мм.

При экспериментальных исследованиях топливный бак харвестера заполнялся до горловины и осуществлялась обработка участка пасеки с вырубкой ограниченного числа деревьев группами до 50 деревьев. На каждом этапе эксперимента вырубались деревья, имевшие примерно одинаковый диаметр. Лишь при невозможности выборочной вырубке деревьев нужного диаметра производилась полная вырубка всех доступных с одной рабочей позиции назначенных в рубку деревьев.

Для фиксации уровня залитого в бак дизельного топлива использовался способ визуальной фиксации, как наиболее трудоемкий, но в тоже время один из самых точных для выполнения подобных замеров. Фиксация топлива осуществлялась мерной емкостью объемом 1 л с ценой делений 0,1 л (рис. 2). Экспериментальные исследования сопровождались определением диаметров вырубаемых деревьев и их расчетных объемов. После вырубке каждой из указанных групп деревьев осуществлялась остановка машины, заполнение топливного бака до горловины с точной фиксацией объема заправляемого топлива. В ходе эксперимента выполнено более 100 замеров на различных лесосеках. Использованный на практике метод ведения работ позволил наглядно продемонстрировать возможность определения показателей расхода топлива без приобретения и уста-



Рис. 2. Процесс заправки топливного бака харвестера при выполнении эксперимента

Fig. 2. Filling operation of a harvester fuel tank during the experiment

новки специализированного измерительного оборудования. Информация по разработке лесосек, связанная с определением фактического расхода топлива харвестера, на каждом участке пасеки включала в себя анализ числа вырубленных деревьев, их объемных и размерных характеристик и фиксацию расхода топлива с обоснованием его расчетного значения на 1 м³ древесины.

При обработке экспериментальных данных использовалась программа Statistica.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ существующих разработок аналогичных нормативов [14] позволяет сделать вывод, что основное внимание при создании норм расхода топлива машин, задействованных на валке деревьев, отдается размерным характеристикам древостоев с возможностью последующего ввода повышающих коэффициентов, характеризующих дополнительные сложности работы на различных лесных участках, например: работы при установившейся температуре воздуха ниже нормы, работы в режиме учебных действий со стажером, работы на лесных участках со сложным рельефом.

Исходя из этого, при обработке экспериментальных данных ставилась задача оценить влияние на расход топлива размерных характеристик вырубаемого древостоя, как легко поддающегося анализу фактора, имеющего высокую корреляционную связь с результативным признаком. Среди размерных характеристик был выбран диаметр древостоя – самый доступный для наиболее простых и точных замеров по сравнению с другими находящимися в корреляционной зависимости с ним размерными характеристиками деревьев.

Обработка экспериментальных данных, основанная на [6–8], позволила получить регрессионную модель, характеризующую средний расход топлива при различных диаметрах вырубаемого древостоя:

$$P = \frac{58,4}{\sqrt{d^3}} + 0,85,$$

где P – расход топлива, л/м³; d – средний диаметр древостоя, см.

При необходимости использования в модели других размерных характеристик обрабатываемых деревьев, например их объемных показателей, исследователь легко может воспользоваться существующими математическими зависимостями [21] для преобразования формулы.

Анализ полученного решения дал возможность с достоверностью 95 % установить, что средний расход топлива харвестера Silvatec 8266ТН, работающего на лесных участках учебно-опытного лесхоза ПГТУ, находится в пределах:

$$\left[\frac{51,1}{\sqrt{d^3}} + 0,77; \frac{65,7}{\sqrt{d^3}} + 0,92 \right].$$

Значения, попадающие в этот диапазон, могут быть приняты за норматив при определении расхода топлива. Модель получена и может быть использована при средних диаметрах деревьев обрабатываемых лесосек в пределах от 10 до 50 см, что ограничивает ее применение в других производственных услови-

ях. Эффективность использования данной модели по отношению к реальным данным может быть проанализирована при изучении графика (рис. 3).

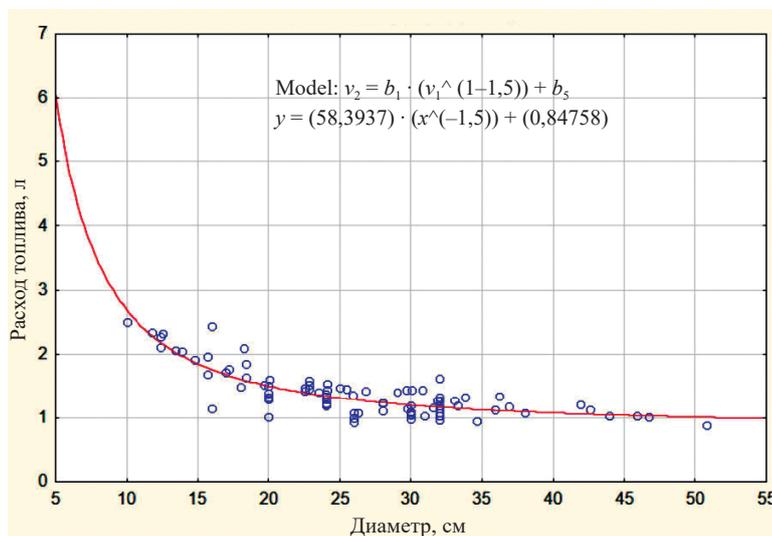


Рис. 3. График анализа точности полученной модели

Fig. 3. Accuracy analysis diagram of the resulting model

Множественный коэффициент детерминации R^2 предложенной нелинейной модели составил 0,73. Значение $R^2 > 0,7$ означает, что изменение результирующего признака в основном связано с изменением включенного в регрессионную модель факторного признака.

По мнению авторов, рост удельного расхода топлива при уменьшении среднего диаметра деревьев на лесных участках связан с увеличением числа движений манипулятора харвестера, захватов и пильного механизма харвестерной головки при заготовке каждого 1 м³ сортиментов. Нелинейный характер полученной математической зависимости полностью согласуется с известными ранее зависимостями для других лесосечных машин [13, 14].

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии и определение их доверительных интервалов представлены в табл. 1. Можно отметить, что все параметры (коэффициенты) уравнения регрессии $\frac{b_1}{\sqrt{d^3}} + b_5$

оказывают существенное влияние на результирующий признак, а значения коэффициентов регрессии по модулю больше их стандартных ошибок.

Таблица 1

Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
b_1	58,4	3,668	15,917	0,00	51,107	65,67
b_5	0,85	0,0387	21,900	0,00	0,770	0,924

В нашем случае все точки (остатки) на нормальном вероятностном графике очень близки к линии, ожидаемой для нормально распределенных остатков (рис. 4). Систематических отклонений фактических данных от теоретической

нормальной прямой не наблюдается. Значит, остатки распределены нормально. На рис. 5 представлен сравнительный анализ предсказанных и наблюдаемых значений, позволяющий сделать вывод об адекватности полученной модели реальным производственным условиям.

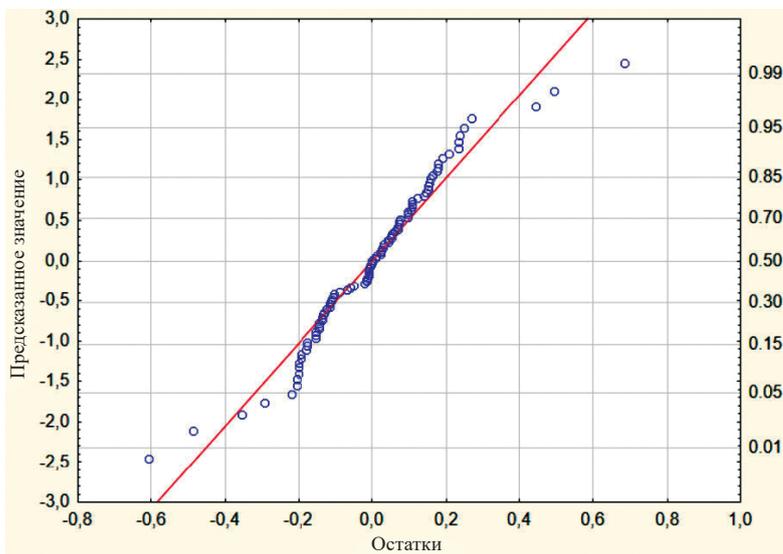


Рис. 4. Нормальный вероятностный график

Fig. 4. Normal probability plot

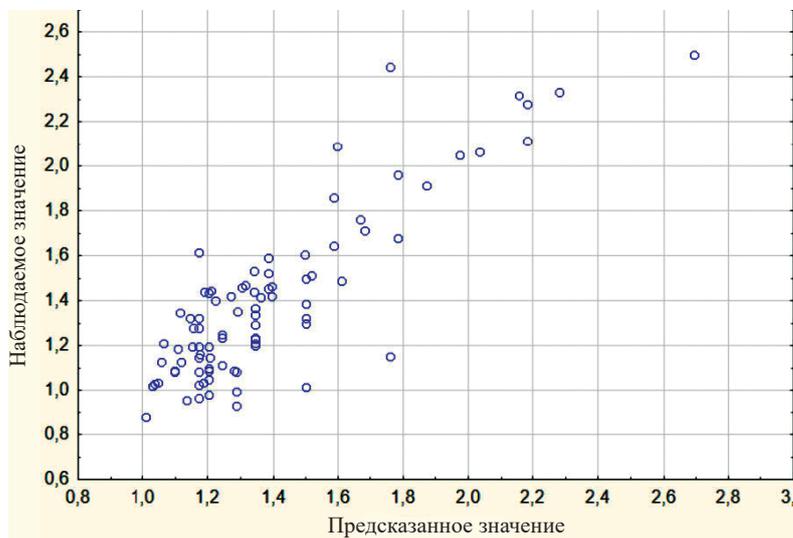


Рис. 5. Сравнение предсказанных и наблюдаемых значений

Fig. 5. Comparison of the predicted and observed values

Расчеты, осуществленные для упрощения применения на практике предложенной математической модели, позволили свести в табл. 2 граничные значения нормируемой величины, рассчитанные по верхней границе нормативного диапазона для основных размерных характеристик древостоя учебно-опытного лесхоза ПГТУ.

Таблица 2

**Нормы расхода топлива при заготовке леса харвестером Silvatec 8266 ТН
в учебно-опытном лесхозе ПГТУ**

Диаметр, см	Расход топлива, л/м ³	Диаметр, см	Расход топлива, л/м ³
12	2,52	26	1,42
14	2,19	28	1,37
16	1,96	30	1,33
18	1,79	32	1,29
20	1,67	34	1,26
22	1,57	36	1,23
24	1,49	38	1,20

Заключение

Рекомендации по нормированию расхода топлива современных лесных многооперационных машин при выполнении различных технологических операций в лесном хозяйстве дают возможность значительно облегчить планирование и расчет эксплуатационных затрат машинно-тракторных агрегатов. Полученная математическая зависимость позволила осуществить расчет нормы расхода топлива харвестера Silvatec 8266ТН при различных параметрах древостоя в смешанных древостоях на территории учебно-опытного лесхоза ПГТУ. Данная зависимость может быть использована и на других лесопромышленных предприятиях для приближенного быстрого расчета норм расхода в отсутствие действующих нормативов с целью сравнения объемов списываемого топлива с предложенным нормативом, а также для расчета проектной себестоимости заготавливаемой продукции при организации новых лесопромышленных предприятий и освоении новых лесных участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андронов А.В., Пегов В.Ю. Исследование зависимости между расходом топлива и квалификацией оператора валочно-сучкорезно-раскряжевой машины // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: материалы II молодеж. междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2018 г. СПб.: Полиграф экспресс, 2018. С. 163–166. [Andronov A.V., Pegov V.Y. Study of the Relationship between Fuel Consumption and Operator's Skill of Harvester. *The Current Issues in Forestry: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Saint Petersburg, November 14–15, 2018*. Saint Petersburg, Poligraf ekspress Publ., 2018, pp. 163–166].
2. Будник П.В., Демчук А.В. Функционально-технологический анализ харвестерной головки // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 9 (15). С. 36–38. [Budnik P.V., Demchuk A.V. Functional and Technological Analysis of Harvester Head. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Ways of Development], 2012, no. 9(15), pp. 36–38].
3. Герасимов Ю.Ю., Сибиряков К.Н., Мошков С.Л., Вяльккю Э., Карвинен С. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии (METLA), 2009. 45 с. [Gerasimov Yu.Yu., Sibiryakov K.N., Moshkov S.L., Vyalkkyu E., Karvinen S. *Calculation of Operatinal Costs of Logging Machines*. Joensuu, METLA Publ., 2009. 45 p.].
4. Голякевич С.А. Анализ эксплуатационных режимов работы многооперационных лесозаготовительных машин // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2013.

№ 2(158). С. 72–78. [Golyakevich S.A. Analysis of Operation Modes of Multifunction Logging Machines. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. No. 2. Forest and Woodworking Industry], 2013, no. 2, pp. 72–78].

5. Голякевич С.А. Энергетические аспекты функционирования многооперационных лесозаготовительных машин // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апреля 2017 г. Минск: БГТУ. 2017. С. 64–68. [Golyakevich S.A. Energy Aspects of Functioning of Multi-Operational Logging Machines. *Logging Production: Problems and Solutions. Proceedings of the International Science and Engineering Conference, Minsk, April 26–28, 2017*. Minsk, BSTU Publ., 2017, pp. 64–68].

6. ГОСТ 24026–80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. Дата введ. 1981–01–01. Переизд. М.: Изд-во стандартов, 1991. 18 с. [GOST 24026–80. *Research Tests. Experiment Planning. Terms and Definitions*. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1991. 18 p.].

7. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. Дата введ. 2010–04–15. Послед. изм. 12.09.2018. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с. [GOST R 8.563–2009. *State System for Ensuring Uniformity of Measurements. Procedures of Measurements*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 15 p.].

8. ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Ч. 4. Выявление и обработка выбросов. Дата введ. 2018–12–01. М.: Стандартинформ, 2017. 48 с. [GOST R ISO 16269-4–2017. *Statistical Methods. Statistical Data Presentation. Part 4. Detection and Treatment of Outliers*. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 48 p.].

9. Демчук А.В. Модернизация технологического оборудования харвестера для повышения эффективности вывозки сортиментов // Инж. вестн. Дона. 2012. Т. 20, № 2. С. 542–546. [Demchuk A.V. The Technological Equipment Modernization for the Harvester on Purpose Efficiency of Removal Assortments. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, vol. 20, iss. 2, pp. 542–546].

10. Дурманов М.Я., Спиридонов С.В., Михайлов О.А. Оценка часового расхода топлива лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата на стадии проектирования // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы 3-й междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 23–24 мая 2018 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 164–167. [Durmanov M.Ya., Spiridonov S.V., Mihaylov O.A. Estimation of Fuel Consumption per Hour of a Forestry Machine-Tractor Unit at the Design Stage. *Russia's Forests: Politics, Industry, Science and Education: Proceedings of the 3rd International Science and Engineering Conference, Saint Petersburg, May 23–24, 2018*. Saint Petersburg, SPbSFTU Publ., 2018, pp. 164–167].

11. Жаденов В.С., Заикин А.Н., Лобанов В.Н., Чайка О.Р. Технологическое оборудование лесозаготовительных машин (Теория, конструкция, эксплуатация). Брянск: БГИТА, 2005. 254 с. [Zhadenov V.S., Zaikin A.N., Lobanov V.N., Chayka O.R. *Processing Equipment of Logging Machines (Theory, Construction and Operation)*. Bryansk, BGITA Publ., 2005. 254 p.].

12. Иванов А.С., Морозов О.А. Определение расхода топливо-смазочных материалов и выработки тракторов Джон Дир в условиях Тюменской области // Науч. журн. КубГАУ. 2017. № 133(09). С. 402–410. [Ivanov A.S, Morozov O.A. Rationing of Fuel-Lubricants Consumption and Productivity of Tractors by John Deere in the Tyumen Region. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2017, no. 133, pp. 402–410]. DOI: [10.21515/1990-4665-133-032](https://doi.org/10.21515/1990-4665-133-032)

13. Нормы расхода горюче-смазочных материалов на механизированные работы, выполняемые в лесном хозяйстве: утв. приказом Рослесхоза от 13.09.1999 № 180. 124 с. [Consumption Rates of Fuel and Lubricants for Mechanized Operations Performed in Forestry. Approved by the Order of the Federal Forestry Agency No. 180 on September 13, 1999. 124 p.].

14. Нормы расхода топлива на многооперационную лесозаготовительную технику в организациях министерства лесного хозяйства и рекомендации по их применению. Минск, 2011. 50 с. [*Fuel Consumption Rates for Multi-Operation Logging Equipment in Organizations of the Ministry of Forestry and Recommendations on Their Use*. Minsk, 2011. 50 p.].
15. Пошарников Ф.В. Анализ состояния технического оснащения лесозаготовительной промышленности // Лесотехн. журн.. 2012. № 2. С. 100–105. [Posharnikov F.V. Equipment State Analysis of the Logging Industry. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2012, no. 2, pp. 100–105].
16. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р (ред. от 20.09.2018) «О введении в действие методических рекомендаций “Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте». Доступ. из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». [*Decree of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. AM-23-p on March 14, 2008: On the Implementation of the Methodological Guidelines “Consumption Rates of Fuel and Lubricants for Road Transport”*].
17. Рукомойников К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127. [Rukomojnikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 120–127]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.1.120](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ee2/120_127.pdf
18. Симанович В.А., Исаченков В.С., Арико С.Е. Топливная экономичность колесных трелевочных тракторов с различной конструкцией технологического оборудования // Тр. БГТУ. № 2. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2015. № 2 (175). С. 84–88. [Simanovich V.A., Isachenkov V.S., Ariko S.E. Fuel Efficiency of Wheeled Skidder with Different Structure of Technological Equipment. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. No. 2. Forest and Woodworking Industry], 2015, no. 2(175), pp. 84–88].
19. Сюнев В.С., Селиверстов А.А. Рабочие органы харвестеров: проектирование и расчет. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 204 с. [Syunev V.S., Seliverstov A.A. *Working Bodies of Harvesters: Engineering and Design*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2005. 204 p.].
20. Сюнев В.С., Соколов А.П., Коновалов А.П., Катаров В.К., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Карвинен С., Вяльккю Э. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. 126 с. [Syunev V.S., Sokolov A.P., Konovalov A.P., Katarov V.K., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., Karvinen S., Vyalkkyu E. *Comparison of Logging Technologies in Timber Companies of the Republic of Karelia*. Joensuu, METLA Publ., 2008. 126 p.].
21. Ширнин Ю.А., Царев Е.М., Рукомойников К.П. Технология и оборудование малообъемных лесозаготовок и лесовосстановление. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. 182 с. [Shirnin Yu.A., Tsarev E.M., Rukomojnikov K.P. *Technology and Equipment for Low-Volume Logging and Reforestation*. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2019. 182 p.].
22. Ackerman P.A., Williams C., Ackerman S., Nati C. Diesel Consumption and Carbon Balance in South African Pine Clear-Felling CTL Operations: A Preliminary Case Study. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, vol. 38, iss. 1, pp. 65–72.
23. Pandur Z., Horvat D., Šušnjar M., Šarac Z. Može li se komercijalni sustav upravljanja vozilima (FMS) koristiti u praćenju rada i istraživanjima forvardera? *Nova mehanizacija šumarstva* [Journal for theory and application of forestry engineering], 2009, vol. 30, no. 1, pp. 11–17.
24. Pandur Z., Šušnjar M., Bačić M., Lepoglavec K., Nevečerel H., Đuka A. Fuel Consumption of Forwarders in Lowland Forests of Pedunculate Oak. *SEEFOR*, 2018, vol. 9, no. 1, art. 198, pp. 73–80. DOI: [10.15177/see-for.18-07](https://doi.org/10.15177/see-for.18-07)

25. Rukomojnikov K.P., Vedernikov S.V., Gabdrahmanov M.I. A Method for Delimiting Tree-Trunks and a Device for Applying the Method. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, iss. 2, pp. 263–266. DOI: [10.5937/jaes16-16442](https://doi.org/10.5937/jaes16-16442)

26. Väättäinen K., Liiri H., Asikainen A., Sikanen L., Jylhä P., Rieppo K., Nuutinen Y., Ala-Fossi A. Korjureiden ja Korjuuketjun simulointi ainespuun korjuusa. *Metlan työraportteja* [Working Papers of the Finnish Forest Research Institute], 2007, vol. 48. 78 p.

SUBSTANTIATION OF FUEL CONSUMPTION RATES OF A HARVESTER

K.P. Rukomojnikov, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

V.O. Kuptcova, External PhD Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-0594>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net, vika13244@rambler.ru

The research purpose was to substantiate the parameters of diesel fuel consumption during felling by the feller-delimber-slasher Silvatec 8266TH in the forest area of the Mari El Republic. The goal was achieved by conducting the experimental tests using the volumetric procedure of filling the machine tank at the end of the operating cycle. The experimental research was accompanied by fixation of the diameters and volumes of the trees cut down. After cutting down each of these groups of trees, the machine was stopped. The fuel tank was filled to the filler pipe. Each time the researchers fixed the fuel volume filled. Processing of the experimental data allowed us to obtain a regression model. This model characterizes the average fuel consumption for various tree diameters. Analysis of the obtained solution made it possible to find out that the average fuel consumption of a Silvatec 8266TH harvester working in the forest areas of the scientific and experimental forestry of the Volga State University of Technology depends on the average diameter of the cut trees. The multiple coefficient of determination (R^2) of the resulting non-linear model was 0.73. The obtained mathematical dependence can be used by timber enterprises for the approximate rapid calculation of the consumption rates in the absence of running standards. Calculations can be carried out to substantiate the volume of the consumed fuel and to calculate the project cost of harvested products in the development of new forestry enterprises and new forest areas.

For citation: Rukomojnikov K.P., Kuptcova V.O. Substantiation of Fuel Consumption Rates of a Harvester. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127

Keywords: feller-delimber-slasher, logging, regression model, fuel consumption rates, energy consumption, cut-to-length.

Поступила 16.07.19 / Received on July 16, 2019



УДК 674.028.9+674.049.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-128-142

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СКЛЕИВАНИЯ
ДРЕВЕСИНЫ ПО ДЛИНЕ НА ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ
ПРЕССОВАННЫЕ ШИПЫ***О.А. Рублева¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [Q-7239-2017](https://orcid.org/0000-0003-0756-6130).**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0756-6130>**А.Г. Гороховский², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](https://orcid.org/0000-0001-8847-8217).**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>*¹Вятский государственный университет, ул. Московская, д. 36, г. Киров, Россия, 610000; e-mail: olga_ru@vyatsu.ru²Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: goragegr@yandex.ru

Клеевые соединения по длине широко распространены в производстве изделий из древесины. Однако наиболее часто применяемая технология сращивания на зубчатые шипы имеет ряд недостатков (наличие отходов, дорогостоящий режущий инструмент и др.). Предложен альтернативный способ сращивания на многократные прямоугольные шипы, изготовленные прессованием. Промышленное внедрение нового способа требует подтверждения высокого качества клеевого шипового соединения. Основным показателем качества является прочность соединения. Цель исследования – экспериментальная оценка прочности при растяжении и изгибе соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы (на примере заготовок из древесины сосны). Изучены соединения двух типоразмеров (А и Б) с шагом 4,2 и 8,2 мм и глубиной проушины 10 и 20 мм соответственно. Прочность образцов определяли с учетом требований ГОСТ 15613.4 и ГОСТ 15613.5. Для оценки качества соединений использовали показатель «относительная прочность» – отношение прочности соединения к прочности цельной древесины. Статистическая обработка проводилась как по группам данных, так и для каждого типоразмера и каждого вида испытания отдельно. Это позволило установить средние значения прочности для каждой отдельной группы образцов, а также получить статистически обоснованную объединенную оценку некоторых показателей. Соединения типа А (с мелкими шипами) показали лучшие результаты по прочности при растяжении (59,5 %) по сравнению с типом Б (53,2 %). Установлено, что при обработке результатов испытаний на изгиб в исследованном диапазоне не выявлено статистически значимого влияния типа соединения. Поэтому средняя прочность при изгибе (80,2 %) характеризует оба типа соединения. Кроме того, прочность этих двух типов соединений с достаточной достоверностью может быть охарактеризована и средней прочностью при растяжении (56,4 %). При этом оба типа соединения соответствуют по прочности требованиям стандартов на изделия с использованием клеевых соединений по длине. Полученные результаты варьируют в сравнительно узком диапазоне, что свидетельствует о стабильном качестве клеевых соединений на прямоугольные шипы, изготовленных способом прессования. Проведенное исследование подтвердило возможность применения прямоугольных прессованных шипов для изготовления соединений на их основе.

Для цитирования: Рублева О.А., Гороховский А.Г. Экспериментальная оценка прочности склеивания древесины по длине на прямоугольные прессованные шипы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 128–142. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-128-142

Ключевые слова: шиповые соединения, сращивание по длине, прямоугольный шип, прессование древесины, прочность склеивания соединения.

Введение

Сращивание древесины по длине широко применяется в производстве клееной продукции, столярно-строительных изделий и клееных деревянных конструкций. Среди наиболее известных соединений по длине можно отметить соединение на ус, торцовое (впритык), ступенчатое (вполдерева), шипом в торцовый паз; наиболее распространено соединение на зубчатый шип [1, 2, 21, 38].

Зубчатые соединения, несмотря на хорошие эксплуатационные свойства и экономичность, связанную с малыми потерями материала при нарезке шипов, имеют ряд недостатков. К ним относятся: сложность конструкции фрезерного инструмента; существенные затраты на его приобретение и периодическую заточку; необходимость удаления стружки, образующейся в процессе резания; снижение прочности соединения по причине перерезания волокон и наличия затупления в вершинах шипов [2, 15].

Принципиально иная технология изготовления шипов на торцах заготовок способом торцового прессования, предложенная авторами [14, 16], позволяет устранить указанные недостатки. Соединение на многократные прямоугольные шипы фактически представляет собой комбинацию потенциально высокопрочных клеевых соединений на гладкую фугу [13, 27] и менее прочных торцовых соединений впритык. Промышленное внедрение нового способа сращивания на прямоугольные прессованные шипы требует исследования уровня качества получаемых соединений.

Основным показателем качества клеевого соединения является его прочность [2, 18–20, 29, 30, 33, 35, 37]. Существует несколько подходов к оценке прочности клеевых соединений древесины, которые по сфере применения можно разделить на следующие группы:

расчетные методы, используемые на стадии проектирования соединения и для прогнозирования механических свойств;

экспериментальные методы, применяемые на стадии изготовления соединений к образцам реальных либо специально подготовленных размеров.

К первой группе относятся методы, основанные на использовании аналитических или эмпирических моделей. Разработаны методы расчета клеевых соединений на сдвиг, неравномерный отрыв, скалывание и др. [17]. Данные модели имеют ограниченное применение, поскольку получены для отдельных изученных случаев и не могут охватить все разнообразие соединений.

К этой же группе принадлежит и метод конечных элементов, реализуемый на базе 3D-моделирования [24, 32]. Метод достаточно эффективен при прогнозировании прочности соединений с изначально заданными характеристиками. Однако на практике встречаются затруднения, связанные с анизотропностью, вариативностью, возможными случайными отклонениями свойств древесины [28].

Экспериментальные методы второй группы позволяют сконцентрироваться на свойствах конкретной партии образцов. К ним относятся методы неразрушающего контроля прочности клеевых соединений древесины, позволяющие проводить оценку с достаточной степенью точности [21]. Но при их использовании появляется необходимость разработки стандартизованных методик и применения узкоспециализированного оборудования.

Эта группа также включает стандартизованные методы оценки прочности, основанные на выборочных испытаниях типовых образцов механическим разрушением, которые принято проводить для однородной продукции при фиксации определенных установленных исходных данных: породы древесины [19, 20, 25, 27, 29, 33, 38], геометрических параметров соединения [22, 25, 26, 30, 31, 33, 36, 39], типа клея [25, 29, 30, 34, 38]. При проектировании и изготовлении опытных образцов соединений нового типа такие испытания наиболее целесообразны ввиду их простоты, информативности, адекватности результатов.

Методы испытаний образцов варьируются в зависимости от назначения клееных заготовок, условий их эксплуатации. Прочность склеивания, как правило, оценивается предельным усилием, вызывающим разрушение образца. Применяют испытания на сдвиг (скалывание), растяжение (отрыв), изгиб, кручение. Многие стандарты на изделия с применением клеевых соединений по длине относят к числу основных требования к прочности при изгибе и растяжении [8–10].

Прочность клеевых соединений по длине удобно характеризовать показателем «относительная прочность» – отношением прочности соединения к прочности цельной древесины заготовок [2]. В зарубежной научной литературе также встречается термин «joint efficiency» (эффективность соединения) [25].

Цель исследования – экспериментальная оценка прочности при растяжении и изгибе соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы (на примере заготовок из древесины сосны).

Задачи исследования включали: определение относительной прочности соединений; установление взаимосвязи между типом соединения и его прочностью; сравнение влияние вида испытаний на оценку прочности.

Объекты и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовали заготовки, полученные из сухих пиломатериалов смешанной распиловки из древесины сосны обыкновенной, заготовленной в Кировской области. Пиломатериалы раскраивали вдоль волокон на кратные по длине заготовки, которые затем фрезеровали с четырех сторон и раскраивали по длине с одновременной вырезкой дефектов.

Отбирали заготовки с преимущественно тангенциально-ориентированной пластью, не содержащие сучков, трещин и других пороков, с наклоном волокон не более 15 %. Размеры заготовок по толщине, ширине и длине: 25×40×160 мм. Длина заготовок ориентирована вдоль волокон. Общее количество заготовок для исследования прочности соединений составило 44 шт., в том числе 32 из них предназначались для определения прочности при изгибе, 12 – при растяжении.

Показатели физико-механических свойств древесины образцов определяли по стандартным методикам [5, 6]. Предел прочности древесины образ-

цов при растяжении вдоль волокон $\sigma_{р.д} = 78,45$ МПа, при статическом изгибе – $\sigma_{н.д} = 61,18$ МПа (данные приведены в пересчете на нормализованную влажность 12 %).

Влажность древесины образцов измеряли с помощью влагомера Hydromette compact (фирма «Gann GmbH») по методике из ГОСТ 16588–91 [7]. За среднее значение влажности образцов принимали среднее арифметическое трех замеров; она составила 9 %.

Прессование элементов шиповых соединений на торцах заготовок выполняли на прессе П-10 (ЗИМ «Точмашприбор») при относительной влажности $W_{отн} = (65 \pm 15)$ % и температуре воздуха $T = 20$ °С. Заготовки закрепляли в специальной оснастке (рис. 1, а), обеспечивающей их базирование, фиксацию и четырехсторонний обжим с усилием 1 кН в целях предотвращения появления трещин в процессе прессования. Затем в торец заготовок, вдоль волокон древесины, внедряли профильный пуансон со скоростью 50 мм/мин и средним усилием прессования 28,4 кН. Использовали пуансоны двух типоразмеров (А и Б) (рис. 1, б) с геометрическими параметрами, обеспечивающими требуемые размеры соединений (табл. 1).

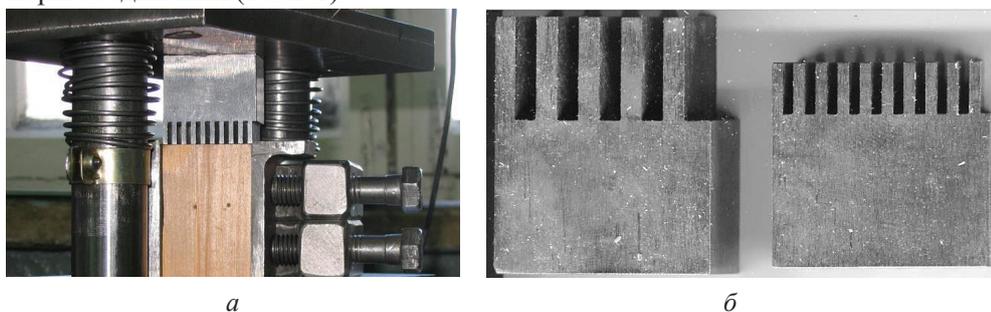


Рис. 1. Фрагмент технологической оснастки с закрепленной заготовкой (а) и внешний вид пуансонов (б) (слева – тип Б, справа – тип А)

Fig.1. A fragment of production tooling with a fixed workpiece (a) and the layout of the punches (b), on the left – type B, on the right – type A

Таблица 1

Геометрические параметры соединений (мм)

Типоразмер	Толщина шипа $S_{ш}$	Ширина проушины B	Шаг шипа $t_{ш}$	Глубина проушины $h_{п}$
А	2	2,2	4,2	10
Б	4	4,2	8,2	20

Внешний вид и параметры обработанной прессованием заготовки приведены на рис. 2.

Склеивание производили не позднее 6 ч после формирования шипов. На профиль прямоугольных шипов на торцах заготовок наносили клей на основе поливинилацетатной дисперсии марки ПВА Супер (ПАО «Акрон»), имеющий предел прочности на сдвиг при растяжении не менее 4,4 МПа. Применяли двухстороннее нанесение клея (расход – 200 г/м²). Время открытой выдержки составляло не более 30 с, закрытой – 30 с. Усилие запрессовки устанавливали на уровне не более 5 кН, время выдержки под давлением – 30 с. После склеивания образцы выдерживали не менее 2 суток при $W_{отн} = (65 \pm 15)$ % и $T = 20$ °С.

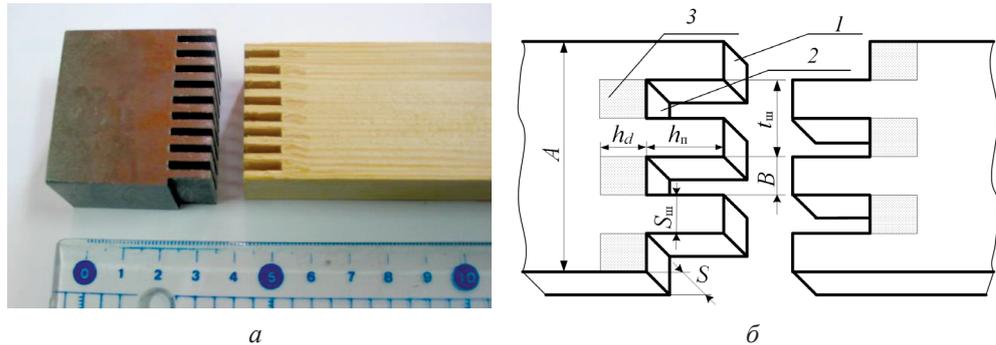


Рис. 2. Внешний вид (а) и параметры прессованной заготовки (б): 1 – шип; 2 – проушина; 3 – деформированная зона; h_d – глубина деформированной зоны; A – ширина заготовки
 Fig. 2. The layout (a) and parameters of the pressed workpiece (б): 1 – tenon; 2 – mortise; 3 – deformed zone; h_d – depth of the deformed zone; A – workpiece width

После выдержки заготовки подвергали механической обработке. Образцы для определения предела прочности соединений при изгибе фрезеровали до получения толщины 20 мм в соответствии с ГОСТ 15613.4–78 (п. 1.2.3) [3]. Образцы для определения предела прочности соединений при растяжении торцевали симметрично с двух сторон для получения длины, равной 300 мм, и раскраивали, чтобы иметь толщину 4 мм по аналогии с требованиями, приведенными в ГОСТ 15613.5–78 (п. 2.2–2.4) [4]. В итоге было получено по 8 образцов соединений каждого типоразмера для каждого вида испытания, что в сумме составило 32 шт.

Экспериментальные исследования прочности шиповых соединений проводили на разрывной машине Р-5. Предел прочности клеевых соединений при растяжении ($\sigma_{p,c}$) определяли по ГОСТ 15613.5–78 [4]. Образец непрерывно нагружали со скоростью 10 мм/мин, разрушение происходило через $(20,0 \pm 10,0)$ с.

Предел прочности клеевых соединений при статическом изгибе $\sigma_{p,и}$ определяли на образцах натуральных размеров в соответствии с ГОСТ 15613.4–78 [3]. Скорость приложения нагрузки устанавливали постоянной и равной 10 мм/мин; разрушение происходило через $(2,5 \pm 0,5)$ мин.

После испытаний контролировали влажность образцов в соответствии с ГОСТ 16588–91 [7], проводя замеры вблизи излома на каждой половине образца. За контрольную величину влажности принимали большее ее значение в одной из половин образца. Полученные результаты пределов прочности пересчитывали на нормализованную влажность 12 % с помощью соотношений, приведенных в [5, 6].

Относительную прочность (C , %) рассчитывали как отношение прочности шипового соединения на растяжение и изгиб к прочности цельной древесины на растяжение и изгиб:

$$C_p = \frac{\sigma_{p,c}}{\sigma_{p,d}} \cdot 100; \quad C_{и} = \frac{\sigma_{и,c}}{\sigma_{и,d}} \cdot 100.$$

В связи с изменчивостью свойств древесины образцов, значительным количеством влияющих факторов механической и прессовой обработки, режимов склеивания нельзя сделать заключение о прочности соединений на основании простого усреднения полученных данных, поэтому требуется их статистиче-

ская обработка. Для этого использовали программу Statistica (доверительная вероятность 95 %). План статистического анализа включал следующие шаги:

- проверка возможности получения обобщенной характеристики прочности, учитывающей данные для всех видов испытаний и типов соединений;
- разделение данных на группы в соответствии с видом испытания и типом соединения;
- проверка нормальности распределения данных в группах;
- проверка однородности дисперсий;
- выявление различий между средними значениями прочности в группах;
- определение статистических показателей и средних значений прочности для соединений каждого типа.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытаний образцов на прочность при растяжении и статическом изгибе, а также относительная прочность соединений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний шиповых соединений на растяжение и изгиб

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
<i>Растяжение</i>				
1	А	По древесине	46,72	59,55
2	А	По древесине	45,91	58,52
3	А	Смешанный	41,06	52,34
4	А	По древесине	46,72	59,55
5	А	Смешанный	44,30	56,47
6	А	По древесине	49,15	62,65
7	А	По древесине	46,24	58,94
8	А	По древесине	53,03	67,60
9	Б	По древесине	42,68	54,40
10	Б	Смешанный	40,42	51,52
11	Б	По древесине	42,84	54,61
12	Б	Смешанный	41,23	52,56
13	Б	По древесине	41,87	53,37
14	Б	По древесине	43,12	54,96
15	Б	По древесине	39,85	50,80
16	Б	Смешанный	42,14	53,72
<i>Изгиб</i>				
17	А	По древесине	54,90	89,74
18	А	По древесине	41,92	68,52
19	А	По древесине	48,91	79,94
20	А	По древесине	52,90	86,47
21	А	По древесине	45,91	75,04
22	А	Смешанный	50,20	82,05
23	А	Смешанный	48,92	79,96
24	А	По древесине	51,23	83,74
25	Б	По древесине	47,91	78,31
26	Б	По древесине	49,91	81,58

Окончание табл. 2

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
27	Б	По древесине	45,91	75,04
28	Б	Смешанный	57,89	94,62
29	Б	Смешанный	40,92	66,88
30	Б	По древесине	43,18	70,58
31	Б	Смешанный	55,67	90,99
32	Б	По древесине	48,95	80,01

Разрушение склеенных образцов при испытаниях на прочность (рис. 3) происходило не только по древесине, но и по древесине и клеевому шву (смешанный (адгезионно-когезионный) характер разрушения).

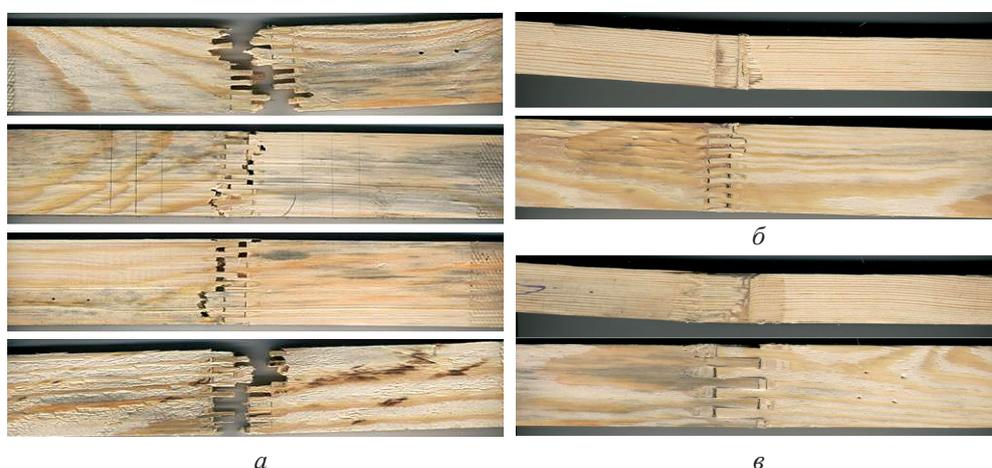


Рис. 3. Примеры разрушения образцов двух типоразмеров в результате испытаний на растяжение (*a*) и изгиб (*б*, *в*): *a*, *б* – типоразмер А; *в* – типоразмер Б (вид сбоку и сверху)
Fig. 3. Examples of samples failure as a result of tensile (*a*) and bending (*б*, *в*) tests: *a*, *б* – type А; *в* – type В (side and top views)

Полученные результаты можно считать удовлетворительными. Известно, что зубчатые соединения могут разрушаться как по древесине, так и по клеевому шву – до 20...30 % от общего числа испытанных образцов [17, 38].

Сравнение абсолютных значений прочности исследованных образцов, приведенных в табл. 2, с требованиями стандартов к прочности пиломатериалов и клееных деревянных конструкций [8, 11, 12] показывает, что соединения соответствуют классам прочности пиломатериалов до класса С30 включительно и могут быть отнесены к достаточно высокому классу прочности элементов конструкций К36. Это позволит использовать соединения на прессованные шипы в заготовках для столярно-строительных и других изделий [9, 10].

На первом этапе статистической обработки проверяли нормальность распределения объединенных данных для опытов 1–32 в целях выявления возможности получения общей характеристики прочности соединений вне зависимости от вида испытаний и типа соединений. Подобные обобщенные характеристики (без указания вида испытаний) встречаются в учебной и научной литературе по зубчатым соединениям: «относительная прочность соединения» 65...75 % [2]; «нормативная прочность» 50...70 % [17]; «прочность свыше 75 %» [38].

Статистический анализ объединенных данных показал, что исследуемое распределение нельзя отнести к нормальным по критерию Шапиро–Уилка. Уровень значимости критерия составил $p = 0,01313$, что меньше заданного уровня $p = 0,05$. Следовательно, гипотеза о нормальности распределения отклоняется. Таким образом, охарактеризовать прочность с помощью обобщенного показателя, учитывающего данные для разных видов испытаний и типов соединений, не представляется возможным.

На втором этапе статистической обработки проверяли нормальность распределения данных, сгруппированных по видам испытаний. При выборе переменной «вид испытания» в качестве группирующей распределение данных близко к нормальному. Этот вывод можно сделать на основании следующих критериев:

по результатам графического анализа нормальности данных с помощью нормально-вероятностных графиков и частотных гистограмм (рис. 4) установлено, что точки фактических данных расположены вблизи теоретической прямой, систематических отклонений не наблюдается, несистематические выбросы отсутствуют;

с помощью теста Шапиро–Уилка для группы данных «на растяжение» определен уровень значимости $p = 0,12936$, для группы «на изгиб» – $p = 0,90210$; в обоих случаях это больше заданного уровня $p > 0,05$, что позволяет не отклонять гипотезу о нормальности распределения.

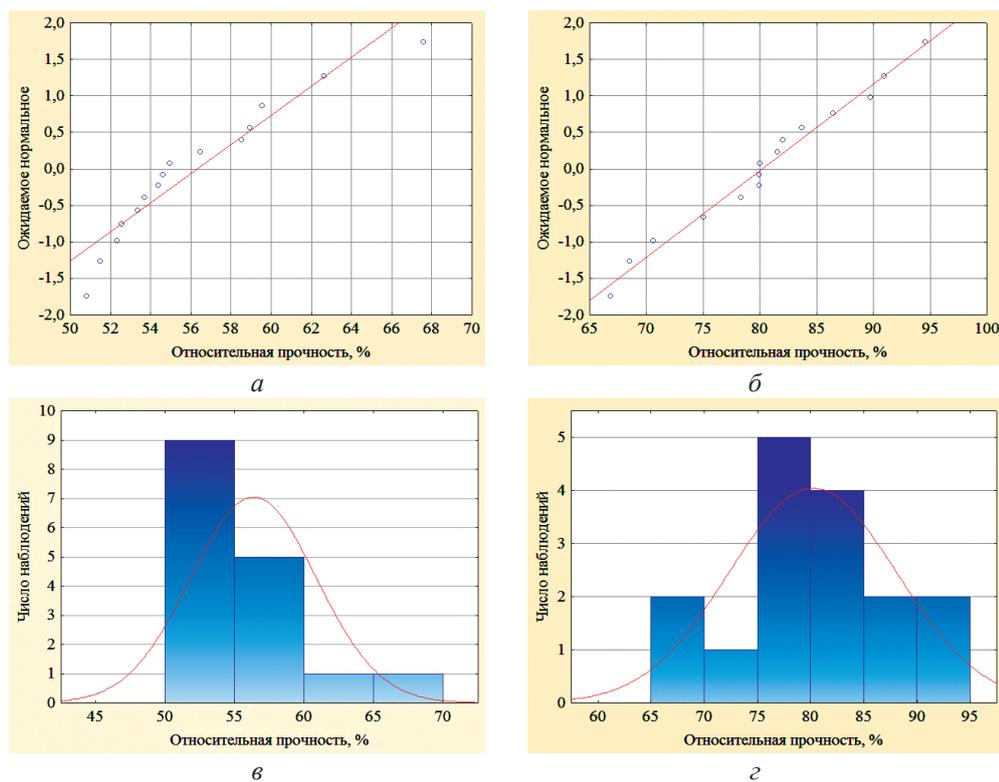


Рис. 4. Нормально-вероятностные графики (а, б) и частотные гистограммы (в, з) для испытаний на растяжение (а, в) и изгиб (б, з) (линией обозначены теоретические кривые нормального распределения)

Fig. 4. Normal probability plots (a, b) and frequency bar charts (v, z) for tensile (a, v) and bending (b, z) tests, line indicates theoretical normal distribution curves

Проверка однородности дисперсий двух выборок по критерию Левена показала, что, поскольку уровень значимости критерия $p \approx 0,10$ больше заданного уровня значимости $p = 0,05$, то однородность дисперсий присутствует. Тогда полученные данные для t-критерия Стьюдента будут достоверными; рассчитанный p -уровень для критерия Стьюдента $p = 0$, что меньше, чем заданный уровень значимости $p = 0,05$. Следовательно, различие между средними в группах есть и оно статистически значимо, т. е. средние значения относительной прочности при растяжении и изгибе отличаются, что дополнительно подтверждает результаты первого этапа статистической обработки: в исследованном диапазоне экспериментальных данных обобщенная характеристика прочности статистически не оправдана.

Полученные результаты демонстрируют рациональность подхода к характеристике относительной прочности соединений без усреднения данных по разным видам испытаний. Подобный подход используют R.W. Jakerst, Z. Ahmad, I. Barboutis и др. [19, 20, 25, 27].

На рис. 5 приведены диаграммы размаха, позволяющие оценить характеристики средней относительной прочности для данных, сгруппированных по видам испытаний. Необходимо отметить, что данные достаточно тесно сгруппированы. Это указывает на сравнительно малое влияние типа соединения на его прочность. Испытанные соединения показывают удовлетворительный уровень относительной прочности на растяжение (56,4 %) и изгиб (80,2 %). Другие исследователи отмечают следующие значения прочности зубчатых шиповых соединений: при изгибе по пласти – 33...50 % [2, 25]; при изгибе по кромке – 49...69 % [25, 38]; при растяжении – 57...80 % [30, 38].

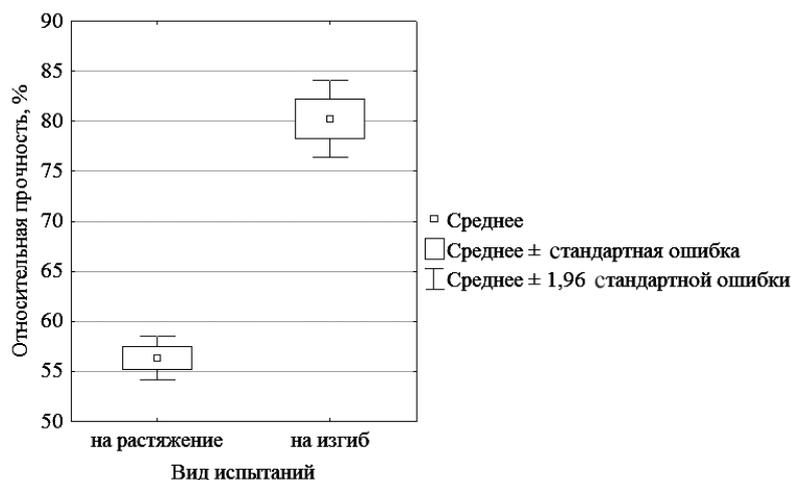


Рис. 5. Диаграмма размаха для данных, сгруппированных по видам испытаний

Fig. 5. Box plots of variables grouped by test type

На третьем этапе статистической обработки в качестве группирующей переменной выбран тип соединения, после чего проведена проверка нормальности распределения для сгруппированных данных. Распределение данных для соединения типа А показало близость к нормальному: уровень значимости критерия Шапиро–Уилка $p = 0,14606 > 0,05$, поэтому гипотеза о нормальности не отклоняется (рис. 6).

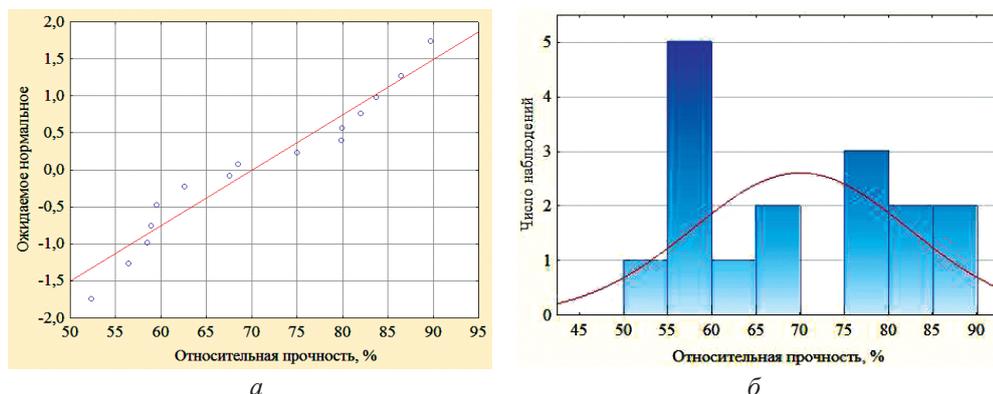


Рис. 6. Нормально-вероятностный график (*a*) и частотная гистограмма (*б*) для соединения типа А (линией обозначены теоретические кривые нормального распределения)

Fig. 6. Normal probability plot (*a*) and frequency bar chart (*b*) for joint of type A, line indicates theoretical normal distribution curves

Аналогичное статистическое исследование для соединения типа Б выявило отсутствие нормальности распределения по критерию Шапиро–Уилка: $p = 0,01841 < 0,05$.

Сравнение средних для двух рассматриваемых групп по критерию Манна–Уитни, применяемому при ненормальном распределении данных, показало, что $p = 0,258196 > 0,05$, следовательно, различие между средними в группах статистически незначимо, т. е. сделать статистически достоверный вывод о влиянии типа соединения на относительную прочность не представляется возможным.

На четвертом этапе статистической обработки данные были разделены на 4 группы, отличающиеся по параметрам «Тип соединения» и «Вид испытания», что позволило отдельно проанализировать влияние этих факторов на зависимую переменную (отклик) «Относительная прочность».

Категоризированные вероятностные графики и частотные гистограммы позволяют характеризовать каждое распределение в целом как нормальное, что подтверждает оценка с помощью критерия Шапиро–Уилка. Уровни его значимости при испытаниях на растяжение для соединений типа А – $p = 0,6852$, для типа Б – $p = 0,5286$; при испытаниях на изгиб – соответственно $p = 0,8656$ и $p = 0,8021$, что больше заданного уровня значимости $p = 0,05$ и позволяет не отклонять гипотезу о нормальности для каждого рассмотренного распределения (рис. 7).

По методике, используемой выше, выявлены статистически значимое различие между средними для соединений типов А и Б при испытаниях на растяжение и отсутствие различия между средними для соединений типа А и Б при испытаниях на изгиб. Для соединения типа А относительная прочность на растяжение равна 59,5 % (с доверительной вероятностью 95,0 % лежит в интервале 55,8...63,2 %), на изгиб – 80,7 % (75,1...86,2 %); для соединения типа Б – соответственно 53,2 % (52,0...54,5 %) и 79,8 % (71,9...87,7 %). Полученные результаты колеблются в сравнительно узком диапазоне, что свидетельствует о стабильном качестве клеевых соединений. Следует отметить, что прочность обоих типов соединений оценивается как достаточно высокая, т. е. соединения пригодны для изготовления изделий из склеенных по длине заготовок.

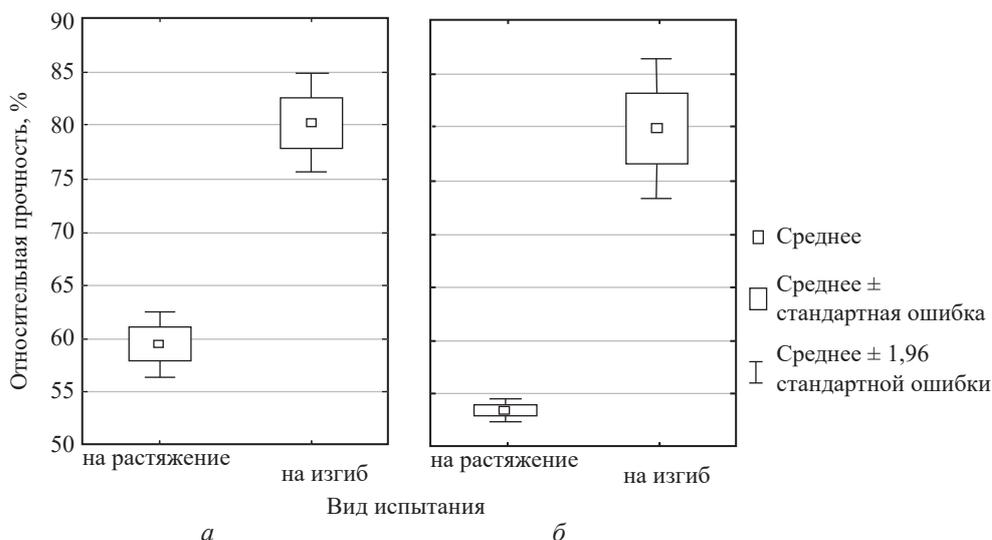


Рис. 7. Категоризированная диаграмма размаха для 4 групп, отличающихся видом испытания и типом соединения: *а* – тип А; *б* – тип Б

Fig. 7. Labeled box plot for 4 groups differing in the test type and joint type: *a* – type A; *б* – type B

Более высокая прочность на растяжение отмечена у соединения типа А с меньшими размерами шипов. В число возможных причин этого явления могут входить меньшие размеры деформированной зоны древесины под дном проушины (см. рис. 2, б). Этот уплотненный участок («пробка» из деформированной древесины [15, 23]) сходен по своему влиянию на прочность с сучками в пиломатериалах из массива древесины. Известно, что наличие сучков снижает прочность пиломатериалов до 60...75 %, а с увеличением размеров сучков возрастает их влияние на прочность [2]. Рост размеров деформированных зон под дном проушин может снижать прочность соединений подобным образом, поэтому меньшие размеры шипов могут быть более предпочтительны с точки зрения повышения прочности соединений. Проверка данной гипотезы является предметом дальнейших исследований. Другим требующим проверки фактором, влияющим на прочность, может быть площадь клеевого шва [13, 14, 38, 39], которая для соединения типа А будет больше. Кроме того, мелкие шипы выглядят более эстетично. Таким образом, в задачи дальнейших исследований входит изучение закономерностей поведения под нагрузкой соединений с мелкими (толщиной порядка 2 мм, длиной 10 мм) шипами.

Выводы

1. Установлена относительная прочность соединений типа А (на растяжение – 59,5 % (с доверительной вероятностью 95 % лежит в интервале 55,8...63,2 %), на изгиб – 80,7 % (75,1...86,2 %)) и типа Б – соответственно 53,2 % (52,0...54,5 %) и 79,8 % (71,9...87,7 %). Результаты испытаний колеблются в сравнительно узком диапазоне, что свидетельствует о стабильном качестве клеевых соединений на прямоугольные прессованные шипы.

2. Среди исследованных типов соединений, отличающихся геометрическими параметрами шипов, не выявлено существенного различия по степени

влияния на прочность, особенно при испытании на изгиб, но установлено существенное различие в прочности в зависимости от вида испытаний. Средняя прочность на растяжение может быть с достаточной достоверностью охарактеризована средним для двух типов соединений значением 56,4 %, при изгибе – 80,2 %.

3. Полученные результаты подтверждают возможность использования соединений на прямоугольные прессованные шипы для изготовления изделий, поскольку прочность этих соединений удовлетворяет требованиям стандартов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барташевич А.А., Трофимов С.П. Конструирование мебели. Минск: Современная школа, 2006. 336 с. [Bartashevich A.A., Trofimov S.P. *Furniture Construction*. Minsk, Sovremennaya shkola Publ., 2006. 336 p.].

2. Волынский В.Н. Технология клееных материалов. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 392 с. [Volynskiy V.N. *Technology of Glued Materials*. Saint Petersburg, PROFIKS Publ., 2008. 392 p.].

3. ГОСТ 15613.4–78. Древесина клееная массивная. Методы определения предела прочности зубчатых клеевых соединений при статическом изгибе. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с. [GOST 15613.4–78. *Glued Massive Wood. Methods for Determining the Ultimate Strength of Serrate Glued Joints in Static Bending*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 7 p.].

4. ГОСТ 15613.5–79. Древесина клееная массивная. Метод определения предела прочности зубчатых клеевых соединений при растяжении. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с. [GOST 15613.5–79. *Glued Massive Wood. Method for Determination of Ultimate Tensile Strength of Finger Glued Joints*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 7 p.].

5. ГОСТ 16483.23–73. Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон. М.: Изд-во стандартов, 1999. 4 с. [GOST 16483.23–73. *Wood. Method for Determination of Ultimate Strength in Tension along the Grain*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 4 p.].

6. ГОСТ 16483.3–84 (СТ СЭВ 390–76). Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. М.: Изд-во стандартов, 1999. 7 с. [GOST 16483.3–84 (ST SEV 390–76). *Wood. Method of Static Bending Strength Determination*. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 7 p.].

7. ГОСТ 16588–91 (ИСО 4470–81). Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. М.: Стандартиформ, 2009. 6 с. [GOST 16588–91 (ISO 4470–81). *Sawn Products and Wooden Details. Methods for Determining Moisture Content*. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 6 p.].

8. ГОСТ 20850–2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2015. 18 с. [GOST 20850–2014. *Wooden Glued Load Bearing Structures. General Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 18 p.].

9. ГОСТ 24700–99. Блоки оконные деревянные со стеклопакетами. Технические условия. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. 55 с. [GOST 24700–99. *Windows of Wood with Glassing Units. Specifications*. Moscow, Gosstroy Rossii, GUP TsPP Publ., 2000. 55 p.].

10. ГОСТ 30972–2002. Заготовки и детали деревянные клееные для оконных и дверных блоков. Технические условия. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. 30 с. [GOST 30972–2002. *Glue Wood Billets and Details for Windows and Doors. Specifications*. Moscow, Gosstroy Rossii, GUP TsPP Publ., 2003. 30 p.].

11. ГОСТ 33080–2014. Конструкции деревянные. Классы прочности конструкционных пиломатериалов и методы их определения. М.: Стандартиформ, 2015. 14 с. [GOST 33080–2014. *Timber Structures. Strength Classes of Structural Sawn Timber and Methods of Its Determination*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 14 p.].

12. ГОСТ 33081–2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения. М.: Стандартинформ, 2015. 10 с. [*GOST 33081–2014. Wooden Glued Bearing Structures. Strength Classes of Structures Elements and Methods for Its Determination*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 10 p.].
13. Жуков В.П. Технология склеивания древесины. Воронеж: ВГЛТИ, 1981. 79 с. [Zhukov V.P. *Wood Gluing Technology*. Voronezh, VGLTI Publ., 1981. 79 p.].
14. Патент 2741614 Российская Федерация. Способ формирования элементов шиповых соединений деревянных заготовок: № 2011116271/13: заявл. 25.04.2011; опубл. 10.01.2013 / О.А. Рублева. [Rubleva O.A. *Method of Forming Finger Joints in Wood Blanks*. Patent RF no. RU 2471614 C1, 2013].
15. Пластинин С.Н. Производство клееной продукции на лесопильных предприятиях. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 48 с. [Plastinin S.N. *Manufacturing of Glued Products at Sawmills*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 48 p.].
16. Рублева О.А. Формирование прямоугольных шипов способом торцового прессования // Лесотехн. журн. 2013. № 4 (вып. 12) С. 126–133. [Rubleva O.A. Formation of Rectangular Tenons by Mechanical Pressing Method. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2013, no. 4(12), pp. 126–133]. DOI: [10.12737/2191](https://doi.org/10.12737/2191)
17. Фрейдин А.С., Вуба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 224 с. [Freydin A.S., Vuba K.T. *Prediction of the Properties of Adhesive Wood Joints*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 224 p.].
18. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб.: СПбГУ, 1992. 168 с. [Chubinskiy A.N. *Formation of Adhesive Joints of Wood*. Saint Petersburg, SPbGU Publ., 1992. 168 p.].
19. Ahmad Z., Lum W.C., Lee S.H., Razlan M.A., Wan Mohamad W.H. Mechanical Properties of Finger Jointed Beams Fabricated from Eight Malaysian Hardwood Species. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 145, pp. 464–473. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016)
20. Barboutis I., Vasileiou V. Strength of Finger-Jointed Beech Wood (*Fagus sylvatica*) Constructed with Small Finger Lengths and Bonded with PU and PVAC Adhesives. *PRO-Ligno*, 2013, vol. 9, iss. 4, pp. 359–364.
21. Biechele T., Chui Y.H., Gong M. Assessing Stiffness on Finger-Jointed Timber with Different Non-Destructive Testing Techniques. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products: Proceedings of the Final Conference of COST Action E53, Edinburgh, May 4–7, 2010*. Edinburgh, Edinburgh Napier University. 2010, pp. 522–528.
22. Džinčić I., Živanić D. The Influence of Fit on the Distribution of Glue in Oval Tenon/Mortise Joint. *Wood Research*, 2014, vol. 59, no. 2, pp. 297–302.
23. Hesselbach J., Hoffmeister H.-W., Looß T. Punching in Industrial Wood Machining: An Alternative Production Process to Drilling. *Production Engineering*, 2007, vol. 1, iss. 4, pp. 365–370. DOI: [10.1007/s11740-007-0061-5](https://doi.org/10.1007/s11740-007-0061-5)
24. Hu W., Guan H., Zhang J. Finite Element Analysis of Tensile Load Resistance of Mortise-and-Tenon Joints Considering Tenon Fit Effects. *Wood and Fiber Science*, 2018, vol. 50, no. 2, pp. 121–131.
25. Jakerst R.W. *Finger-Jointed Wood Products*. Research Paper FPL 382. Forest Products Laboratory. 1981. 26 p.
26. Khelifa M., Celzard A., Oudjene M., Ruelle J. Experimental and Numerical Analysis of CFRP-Strengthened Finger-Jointed Timber Beams. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, vol. 68, pp. 283–297. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.04.007)
27. Kishan Kumar V.S., Sharma C.M., Gupta S. Compression and Flexural Properties of Finger Jointed Mango Wood Sections. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 151–160. DOI: [10.4067/s0718-221x2015005000015](https://doi.org/10.4067/s0718-221x2015005000015)

28. Konopka D., Gebhardt C., Kaliske M. Numerical Modelling of Wooden Structures. *Journal of Cultural Heritage*, 2017, vol. 27, pp. S93–S102. DOI: [10.1016/j.culher.2015.09.008](https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.09.008)
29. Lara-Bocanegra A.J., Majano-Majano A., Crespo J., Guaita M. Finger-Jointed *Eucalyptus globulus* with 1C-PUR Adhesive for High Performance Engineered Laminated Products. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 135, pp. 529–537. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004)
30. Lee S.J., Eom C.D., Kim K.M. Structural Performance of Finger-Jointed Lumber with Different Joint Configurations. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2011, vol. 39, no. 2, pp. 172–178.
31. Likos E., Haviarova E., Eckelman C.A., Erdil Y.Z., Ozcifci A. Effect of Tenon Geometry, Grain Orientation, and Shoulder on Bending Moment Capacity and Moment Rotation Characteristics of Mortise and Tenon Joints. *Wood and Fiber Science*, 2012, vol. 44, no. 4, pp. 462–469.
32. Mackerle J. Finite Element Analyses in Wood Research: A Bibliography. *Wood Science and Technology*, 2005, vol. 39, no. 7, pp. 579–600. DOI: [10.1007/s00226-005-0026-9](https://doi.org/10.1007/s00226-005-0026-9)
33. Özçifçi A., Yapıcı F. Structural Performance of the Finger-Jointed Strength of Some Wood Species with Different Joint Configurations. *Construction and Building Materials*, 2008, vol. 22, iss. 7, pp. 1543–1550. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020)
34. Prekrat S., Smardzewski J. Effect of Glueline Shape on Strength of Mortise and Tenon Joint. *Drvna industrija*, 2010, vol. 61, no. 4, pp. 223–228.
35. Ratnasingam J., Scholz F. Optimization of Finger-Jointing in Rubberwood Processing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2009, vol. 67, iss. 2, pp. 241–242. DOI: [10.1007/s00107-008-0295-8](https://doi.org/10.1007/s00107-008-0295-8)
36. Ryu H.S., Ahn S.Y., Park H.M., Byeon H.S., Kim J.M. Effect of Distance between Finger Tip and Root Width on Compressive Strength Performance of Finger-Jointed Timber. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2004, vol. 32, no. 4, pp. 66–73.
37. Tran V.-D., Oudjene M., Méausoone P.-J. FE Analysis and Geometrical Optimization of Timber Beech Finger-Joint under Bending Test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, vol. 52, pp. 40–47. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007)
38. Vrazel M., Sellers T. The Effects of Species, Adhesive Type, and Cure Temperature on the Strength and Durability of a Structural Finger-Joint. *Forest Products Journal*, 2004, vol. 54, iss. 3, pp. 66–75.
39. Wilczyński A., Warmbier K. Effect of Joint Dimensions on Strength and Stiffness of Tenon Joints. *Folia Forestalia Polonica. Series B – Wood Science*, 2003, vol. 34, pp. 53–66.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF STRENGTH OF END JOINTS WITH RECTANGULAR PRESSED FINGERS

O.A. Rubleva¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [Q-7239-2017](https://orcid.org/0000-0003-0756-6130),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0756-6130>

A.G. Gorokhovskiy², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6030-2018](https://orcid.org/0000-0001-8847-8217),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8847-8217>

¹Vyatka State University, ul. Moskovskaya, 36, Kirov, 610000, Russian Federation;
e-mail: olga_ru@vyatsu.ru

²Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: goralegr@yandex.ru

End jointing of wooden blanks is widely distributed in the manufacture of wood products. The most commonly used splicing technology on finger joints with pointy fingers has a number of drawbacks, including the presence of waste and an expensive cutting tool. We proposed an alternative type of end jointing with multiple rectangular tenons made by pressing.

Commercialization of the new splicing method requires confirmation of its high quality. The main quality indicator of adhesive joint is its strength. The aim of the study is an experimental evaluation of the bending strength and tensile strength of end joints with rectangular pressed fingers (case study of pine wood blanks). The joints of two types: A and B, with a pitch of 4.2 and 8.2 mm and depth of mortises of 10 and 20 mm, respectively, were studied. The strength of the samples was determined taking into account the requirements of the Russian State Standards GOST 15613.4 and GOST 15613.5. In order to evaluate the quality of joints, we used the indicator “relative strength”; it is the ratio of the joint strength to the solid wood strength. Statistical processing was carried out both by data groups, and for each size and each test type separately. This allowed us to establish the average values of strength for each individual group of samples, as well as to obtain a statistically valid joint evaluation of some indicators. Joints of type A with small fingers showed better results in tensile strength (59.5 %) compared to joints of type B (53.2 %). No statistically significant effect of the joint type was revealed, when processing the results of bending tests in the studied range. Therefore, the average bending strength (80.2 %) characterizes both types of joints. Moreover, the strength of these two types of joints with sufficient reliability can be characterized by the average tensile strength (56.4 %). At the same time, both types of joints correspond in strength to the standard requirements to the products with adhesive end joints. The test results vary in a relatively narrow range, which indicates a stable quality of adhesive joints with rectangular fingers made by pressing. This study demonstrates the possibility of using rectangular pressed fingers for the manufacture of joints based on them.

For citation: Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G. Experimental Evaluation of Strength of End Joints with Rectangular Pressed Fingers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 128–142. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-128-142

Keywords: finger joints, splicing, rectangular finger, wood pressing, bond strength of a joint.

Поступила 06.06.19 / Received on June 6, 2019

УДК 621.933.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-143-150

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ ВАЛЬЦОВАННЫХ ПОЛОСОВЫХ НЕРАСТЯНУТЫХ ПИЛ

Г.Ф. Прокофьев¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [G-9482-2019](https://orcid.org/0000-0003-4494-4989),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4494-4989>

А.М. Тюрин², канд. техн. наук, вед. инж.; ResearcherID: [G-9823-2019](https://orcid.org/0000-0003-1250-2238),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1250-2238>

М.Ю. Кабакова¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [F-6036-2019](https://orcid.org/0000-0002-4158-9224),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4158-9224>

О.Л. Коваленко¹, аспирант; ResearcherID: [H-1812-2019](https://orcid.org/0000-0003-1817-3949),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1817-3949>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: g.prokofjev@narfu.ru, m.kabakova@narfu.ru, o.kovalenko@narfu.ru

²ПАО «Севералмаз», ул. Карла Маркса, д. 15, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: alexejtyrin@rambler.ru

Приводятся полученные теоретически и подтвержденные экспериментально результаты исследований начальной жесткости вальцованных полосовых нерастянутых пил. Разработана математическая модель, позволяющая производить расчет начальной жесткости полосовых нерастянутых пил в целях обоснования расстояния между направляющими и параметров пил, обеспечивающих точное пиление древесины. Для проверки справедливости допущений, принятых при выполнении теоретических исследований, проведены эксперименты. Осуществлен анализ результатов исследований и сделаны следующие выводы: теоретические и экспериментальные значения начальной жесткости вальцованных полосовых пил практически совпадают (разница не более 2 %); жесткость вальцованной пилы при использовании теоретических данных превышает жесткость невальцованной пилы более чем на 80 %. Согласно технологическим режимам РПИ 6.1-00 «Подготовка рамных пил», для обеспечения требуемой точности пиления древесины начальная жесткость полосовой пилы должна быть не менее 60...70 Н/мм. Полученные результаты позволяют определить основные параметры нерастянутых полосовых пил, обеспечивающих это условие.

Для цитирования: Прокофьев Г.Ф., Тюрин А.М., Кабакова М.Ю., Коваленко О.Л. Определение начальной жесткости вальцованных полосовых нерастянутых пил // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 143–150. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-143-150

Ключевые слова: точность пиления древесины, начальная жесткость полосовых пил, условия точного пиления, направляющие для пил, напряженное состояние при вальцевании.

Введение

Точность пиления древесины зависит от рабочей жесткости пил, которая в свою очередь определяется их начальной жесткостью (без учета сил резания) и устойчивостью к режимам пиления [8–11]. Вопросы устойчивости и начальной жесткости полосовых пил (рамных и ленточных) рассмотрены отечественными и зарубежными авторами [1, 3, 14–21]. Однако в этих работах отсутствуют сведения о начальной жесткости нерастянутых полосовых пил,

совершающих движение в направляющих, с учетом внутренних напряжений в пилах от вальцевания. В технологических режимах РПИ 6.1-00 [7] отмечается, что для обеспечения необходимой точности пиления жесткость пил должна быть не менее 60 Н/мм.

Цель исследования – теоретическое определение зависимости начальной жесткости полосовых нерастянутых пил от различных факторов с учетом напряжений от вальцевания и изменения их свободной длины за счет установки направляющих над и под распиливаемым материалом.

Полученные материалы позволят установить условия, при которых возможно точное пиление древесины нерастянутыми полосовыми пилами.

Объекты и методы исследования

Жесткость пилы j определяется как отношение боковой сосредоточенной силы Q , приложенной к режущей кромке, к ее отклонению w под действием этой силы. Отсюда следует, что расчет жесткости пил сводится к нахождению их прогибов u от действия боковой силы Q на пилу в плоскости ее наименьшей жесткости. Для расчета прогибов пилы под действием боковой силы принята схема пилы, представленная на рис. 1.

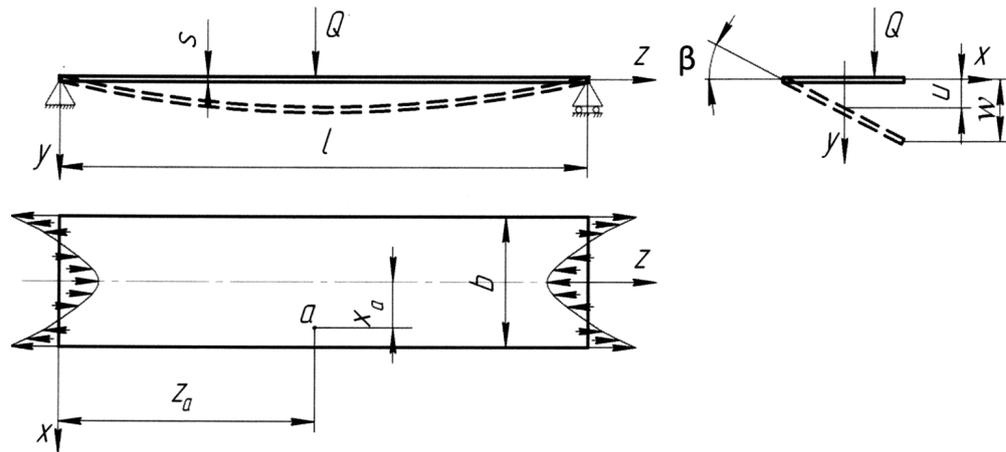


Рис 1. Схема пилы, принятая для определения ее прогибов (u) при действии сосредоточенной нагрузки (Q) и с учетом свободной длины пилы (l) в плоскости ее наименьшей жесткости (расстояния между направляющими)

Fig. 1. The saw scheme adopted for determining its deflections (u) under the action of a concentrated load (Q) and taking into account the free length (l) of the saw in the plane of its least stiffness (guide spacing)

Выразим потенциальную энергию деформации полотна пилы как сумму потенциальных энергий изгиба $U_{и}$, растяжения $U_{р}$ и кручения $U_{кр}$:

$$U = U_{и} + U_{р} + U_{кр} = \frac{B}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} \int_0^l \int_{-b/2}^{+b/2} N_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 dx dz + \frac{C}{2} \int_0^l \left(\frac{d\beta}{dz} \right)^2 dz, \quad (1)$$

где B , C – соответственно изгибная и крутильная жесткости пилы, Н·мм²; l – расстояние между направляющими; N_z – нормальные усилия от вальцевания, приходящиеся на еди-

ницу ширины полотна пилы, Н/мм, $N_z = \sigma s \left(\frac{4}{b^2} x^2 - \frac{1}{3} \right)$; σ – напряжения от вальцевания, МПа; s – толщина пилы, мм; b – толщина полотна пилы, мм; β – угол закручивания полотна пилы при кручении, рад.

Зависимость σ от степени вальцевания f , характеризуемой величиной световой щели при продольном изгибе пилы по дуге окружности радиусом $R = 1,75$ м, определяется с помощью формулы А.Э. Грубе [2].

При действии силы Q в точке a с координатами z_a и x_a (рис. 1) происходит деформация полотна пилы, которая характеризуется прогибом ее оси u и углом закручивания β вокруг нее [12, 13]:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_n \sin \frac{n\pi z_a}{l}; \quad \beta = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\beta}_n \sin \frac{n\pi z_a}{l}.$$

Отсюда прогиб в точке полотна пилы с текущими координатами z_a и x_a :

$$w = u + \beta x_a = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\bar{u}_n \sin \frac{n\pi z_a}{l} + \bar{\beta}_n x_a \sin \frac{n\pi z_a}{l} \right), \quad (2)$$

где n – число рядов членов ряда; z_a – расстояние от левой опоры (направляющей) до рассматриваемой точки a по оси y ; x_a – расстояние от центра пилы до точки a по оси x .

После подстановки в уравнение (1) значений N_z , u , β , w и сделав необходимые преобразования, получим следующее уравнение, выражающее потенциальную энергию деформации полотна пилы:

$$U = \frac{\pi^2}{4l} C \sum_{n=1}^{n=\infty} n^2 \bar{\beta}_n^2 + \frac{\pi^4}{4l^3} B \sum_{n=1}^{n=\infty} n^4 \bar{u}_n^2 + \frac{\pi^2 b}{2l} \sum_{n=1}^{n=\infty} n^2 \frac{1}{90} \sigma s b^2 \bar{\beta}_n^2.$$

Сила Q совершает работу, потенциальная энергия которой

$$W = Q \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\bar{u}_n \sin \frac{n\pi z_a}{l} + \bar{\beta}_n x_a \sin \frac{n\pi z_a}{l} \right).$$

Так как полная потенциальная энергия отклонений пилы от действия силы Q определяется как $\Pi = U - W$, то

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{\pi^2}{4l} C \sum_{n=1}^{n=\infty} n^2 \bar{\beta}_n^2 + \frac{\pi^4}{4l^3} B \sum_{n=1}^{n=\infty} n^4 \bar{u}_n^2 + \frac{\pi^2 b}{2l} \sum_{n=1}^{n=\infty} n^2 \frac{1}{90} \sigma s b^2 \bar{\beta}_n^2 - \\ & - Q \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\bar{u}_n \sin \frac{n\pi z_a}{l} + \bar{\beta}_n x_a \sin \frac{n\pi z_a}{l} \right). \end{aligned}$$

Опишем устойчивое равновесие системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{u}_n} &= \frac{n^4 \pi^4 \bar{u}_n B}{2l^3} - Q \sin \frac{n\pi z_a}{l} = 0; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{\beta}_n} &= \frac{n^2 \pi^2 \bar{\beta}_n}{2l} \left(C + \frac{\sigma s b^3}{45} \right) - Q x_a \sin \frac{n\pi z_a}{l} = 0. \end{aligned} \right\}$$

Решим эту систему, делая соответствующие преобразования:

$$\bar{u}_n = \frac{2Ql^3 \left(C + \frac{\sigma sb^3}{45} \right) \sin \frac{n\pi z_a}{l}}{n^4 \pi^4 B \left(\frac{\sigma sb^3}{45} + C \right)}; \quad (3)$$

$$\bar{\beta}_n = \frac{2QlBn^2 \pi^2 x_a \sin \frac{n\pi z_a}{l}}{n^4 \pi^4 B \left(\frac{\sigma sb^3}{45} + C \right)}. \quad (4)$$

Поставив выражения (3) и (4) в уравнение (2), получим формулу для определения отклонения пилы под действием боковой силы Q :

$$w = \frac{2Ql}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{l^2 \left(C + \frac{\sigma sb^3}{45} \right) + x B n^2 \pi^2 x_a}{n^4 \pi^2 B \left(\frac{\sigma sb^3}{45} + C \right)} \sin \frac{n\pi z_a}{l} \sin \frac{n\pi z}{l} \right].$$

Так как жесткость определяется отношением боковой силы Q к отклонению пилы под действием этой силы, то для случая, когда боковая сила приложена к режущей кромке пилы ($x_a = b/2$) на середине ее свободной длины ($z_a = l/2$), начальная жесткость

$$j = \frac{1}{\frac{2l}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{n=\infty} \frac{l^2 \left(C + \frac{\sigma sb^3}{45} \right) + \frac{b^2 B n^2 \pi^2}{4}}{n^4 \pi^2 B \left(\frac{\sigma sb^3}{45} + C \right)}}.$$

Результаты исследования и их обсуждение

При проведении теоретических исследований был сделан ряд допущений. Для проверки справедливости принятых допущений осуществлены опыты на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 2.

Все эксперименты выполнялись на пиле, имеющей следующие параметры: толщина $s = 2,2$ мм; ширина полотна $b = 160$ мм; длина $L = 160$ мм; степень вальцевания $f = 0,3$ мм; материал пилы – сталь 9 ХФ.

Нагрузка $Q = 19,62$ Н прикладывалась на середине свободной длины, на линии межзубовых впадин. Свободная длина пилы l , равная расстоянию между направляющими, была переменной: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 540 мм.

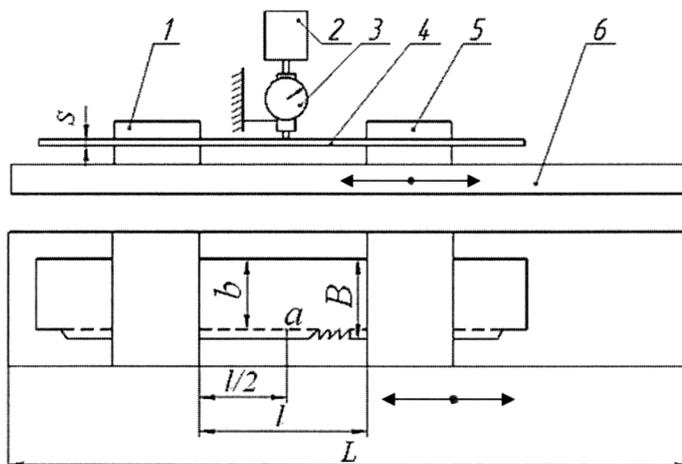


Рис. 2. Принципиальная схема установки для определения начальной жесткости нерастянутых полосовых пил в направляющих: 1 – неподвижная направляющая; 2 – нагрузка; 3 – индикатор часового типа; 4 – полосовая пила; 5 – подвижная направляющая для изменения свободной длины пилы; 6 – корпус

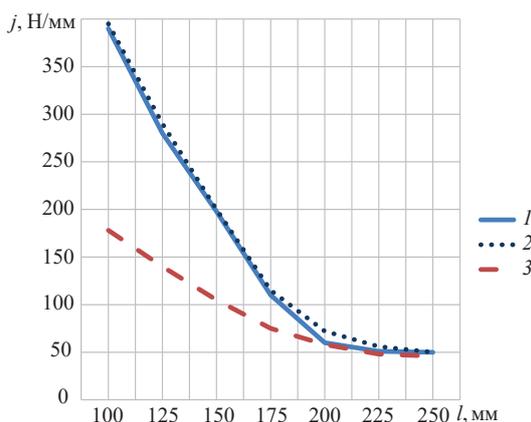
Fig. 2. Layout diagram of the installation for determining the initial stiffness of unstretched strip saws in the guides: 1 – fixed guide, 2 – load; 3 – dial indicator; 4 – strip saw; 5 – movable guide for changing the saw free length; 6 – housing

Таким образом, было выполнено 9 опытов. В каждом опыте проведено по 6 наблюдений. Результаты опытов обрабатывались с использованием методов математической статистики. Замерялись прогибы пилы w под действием силы Q . Жесткость пилы оценивалась отношением Q/w .

По материалам исследований построены графики (рис. 3), демонстрирующие зависимость жесткости (j) пилы от ее свободной длины (l) для вальцованной (теоретические и экспериментальные данные) и невальцованной (теоретические данные) пил.

Рис. 3. Зависимость жесткости полосовой нерастянутой пилы от свободной длины: 1 – вальцованная пила (экспериментальные данные); 2 – вальцованная пила (теоретические данные); 3 – невальцованная пила (теоретические данные)

Fig. 3. The dependence of the stiffness of the strip unstretched saw on the free length: 1 – rolled saw (experimental data); 2 – rolled saw (theoretical data); 3 – non-rolled saw (theoretical data)



Как видно из графиков, значения жесткости вальцованной пилы, полученные теоретически и экспериментально, практически совпадают. Так, при $l = 150$ мм разница не превышает 2 %. Жесткость вальцованной пилы по теоретическим данным более чем на 80 % больше жесткости невальцованной пилы.

Материалы исследований использованы при создании нового лесопильного станка с нерастянутыми полосовыми пилами, совершающими возвратно-поступательное движение в направляющих. Этот станок в отличие от лесопильных рам традиционной конструкции не имеет пильной рамки, захватов и межпильных прокладок. Общий вид узла резания спереди приведен на рис. 4.

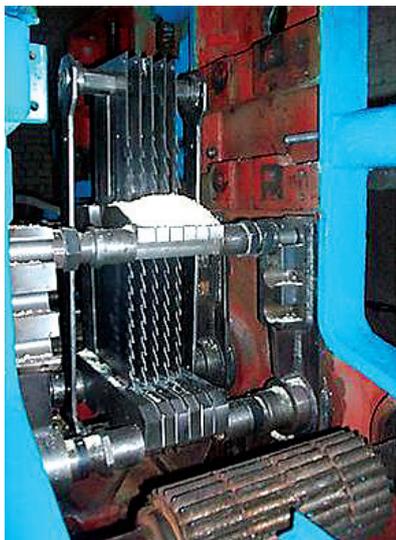


Рис 4. Общий вид узла резания лесопильного станка с полосовыми нерастянутыми пилами, совершающими движение в направляющих
Fig. 4. General view of the cutting unit of the saw machine with strip unstretched saws moving in guides

На конструктивные решения, используемые при создании данного станка, а также на способ установки направляющих получены патенты Российской Федерации [4–6].

Выводы

1. На основании теоретических исследований найдена формула для определения начальной жесткости полосовых нерастянутых вальцованных пил в направляющих.
2. Проведенные эксперименты показали надежность результатов теоретических исследований.
3. Из выполненных расчетов следует, что большое влияние на жесткость оказывают напряжения от вальцевания.
4. Нерастянутые вальцованные полосовые пилы толщиной 2,2 мм при ширине полотна ≥ 120 мм, установленные в направляющих, имеют жесткость, достаточную для точного пиления брусков высотой до 200 мм.
5. Материалы статьи использованы при создании нового лесопильного станка, не имеющего аналогов за рубежом. Новизна подтверждена патентами на изобретения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Блохин М.А. Исследование, разработка и создание лесопильного оборудования с круговым и поступательным движением пильных полотен: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2015. 284 с. [Blokhin M.A. *Research, Development and Creation of Sawmill Equipment with Circular and Translational Movement of Saw Blades*: Dr. Sci. Diss. Arkhangel'sk, 2015. 284 p.]

2. Грубе А.Э. Дереворежущие инструменты. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1958. 472 с. [Grube A.E. *Wood Cutting Tools*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1958. 472 p.]
3. Иванкин И.И. Теоретические исследования начальной жесткости ленточных пил // Изв. вузов. Лесн. журн. 2000. № 3. С. 112–119. [Ivankin I.I. Theoretical Studies of the Initial Stiffness of Band Saws. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2000, no. 3, pp. 112–119].
4. Патент № 117847 Российская Федерация, МПК В27В 3/10. Узел резания лесопильного станка: № 2011108152/13: заявл. 02.03.2011; опубл. 10.07.2012 / Г.Ф. Прокофьев, А.М. Тюрин. [Prokofiev G.F., Tyurin A.M. *Sawmill Cutting Unit*. Patent RF no. RU 117847 U1, 2012].
5. Патент № 2452615 Российская Федерация, МПК В27В 3/10. Узел резания лесопильного станка: № 2011100762/13: заявл. 12.01.2011; опубл. 10.06.2012 / Г.Ф. Прокофьев, Н.Ю. Микловцик, А.М. Тюрин. [Prokof'ev G.F., Miklovtsik N.J., Tjurin A.M. *Saw Mill Cutting Assembly*. Patent RF no. RU 2452615 C1, 2012].
6. Патент № 2480324 Российская Федерация, МПК В27В 3/10. Способ установки направляющих для полосовых «плавающих» нерастянутых пил лесопильного станка: № 2011146386/13: заявл. 15.11.2011; опубл. 27.04.2013 / Г.Ф. Прокофьев, Н.Ю. Микловцик, А.М. Тюрин. [Prokof'ev G.F., Miklovtsik N.J., Tjurin A.M. *Method of Mounting Guides for Floating Non-Stretched Sawmill Bands*. Patent RF no. RU 2480324 C1, 2013].
7. Прокофьев Г.Ф. Технологические режимы РПИ 6.1-00 «Подготовка рамных пил». Архангельск: ЦНИИМОД, 1986. 44 с. [Prokofiev G.F. *Technological Modes of RPI 6.1-00 "Preparation of Frame Saws"*. Arkhangelsk, TsNIIMOD Publ., 1986. 44 p.]
8. Прокофьев Г.Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 240 с. [Prokofiev G.F. *Intensification of Sawing Wood by Frame and Band Saws*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 240 p.]
9. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И. Повышение эффективности пиления древесины на лесопильных рамах и ленточнопильных станках: моногр. / под ред. Г.Ф. Прокофьева. Архангельск: АГТУ, 2009. 380 с. [Prokofiev G.F., Ivankin I.I. *Improving the Efficiency of Sawing Wood on Saw Frames and Band Saws*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2009. 380 p.]
10. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И., Дундин Н.И. Исследование начальной жесткости полосовых пил // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 3. С. 88–95. [Prokofiev G.F., Ivankin I.I., Dundin N.I. Investigation of Initial Hardness of Strip Saws. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2001, no. 3, pp. 88–95]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/432/4326ee98c21689129b0fa784fd7c48f7.pdf>
11. Прокофьев Г.Ф., Иванкин И.И., Казанцев В.А. Повышение качества пиления древесины на лесопильных рамах: моногр. Архангельск: АГТУ, 2007. 192 с. [Prokofiev G.F., Ivankin I.I., Kazantsev V.A. *Improving the Quality of Sawing Wood at Sawmills*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 192 p.]
12. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1955. Т. 2. 567 с. [Timoshenko S.P. *Stability of Elastic Systems*. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1955, vol. 2. 567 p.]
13. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов. 3-е изд. М.: Наука, 1965. Т. 2. 480 с. [Timoshenko S.P. *Strength of Materials*. Moscow, Nauka Publ., 1965, vol. 2. 480 p.]
14. Bathe K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, 1982. 735 p.
15. Calladine C.R. *Theory of Shell Structures*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983. 763 p. DOI: [10.1017/CBO9780511624278](https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278)
16. Hughes T.J.R., Hinton E. *Finite Element Methods for Plates and Shells: Elements Technology*. Swansea, Pineridge Press, 1986, vol. 1. 315 p.
17. Hughes T.J.R., Hinton E. *Finite Element Methods for Plates and Shells: Formulations and Algorithms*. Swansea, Pineridge Press, 1986, vol. 2. 320 p.

18. Irons B., Ahmad S. *Techniques of Finite Elements*. New York, E. Horwood, 1980. 529 p.
19. Kivimaa E. Cutting Force in Frame Sawing. *Paperi ja puu*, 1959, vol. 41, no. 1, pp. 13–16.
20. Porter A. Some Engineering Consideration of High-Strain. *Forest Products Journal*, 1977, vol. 21, no. 4, pp. 24–32.
21. Thunell B. The Stability of the Band Saw Blade. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1970, vol. 28, iss. 9, pp. 343–348.

DETERMINATION OF THE INITIAL STIFFNESS OF UNSTRETCHED ROLLED STRIP SAWS

G.F. Prokofiev¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-9482-2019](https://orcid.org/0000-0003-4494-4989),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4494-4989>

A.M. Tyurin², Candidate of Engineering, Leading Engineer; ResearcherID: [G-9823-2019](https://orcid.org/0000-0003-1250-2238),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1250-2238>

M.Yu. Kabakova¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [F-6036-2019](https://orcid.org/0000-0002-4158-9224),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4158-9224>

O.L. Kovalenko¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [H-1812-2019](https://orcid.org/0000-0003-1817-3949),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1817-3949>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: g.prokofjev@narfu.ru, m.kabakova@narfu.ru, o.kovalenko@narfu.ru

²PJSC Severalmaz, ul. Karla Marksa, 15, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: alexejtyrin@rambler.ru

The paper presents the results of studies of the initial stiffness of rolled strip unstretched saws; theoretically obtained and experimentally confirmed. A mathematical model, that allows calculating the initial stiffness of unstretched strip saws, has been developed in order to justify the distance between the guides and the saw parameters for precise sawing. Experiments were performed for verifying the validity of the assumptions made in carrying out the theoretical research. The analysis of the research results and the following conclusions are made: theoretical and experimental values of the initial stiffness of rolled strip saws practically coincide (the difference does not exceed 2 %); the stiffness of the rolled saw according to the theoretical data exceeds the stiffness of the non-rolled saw by more than 80 %. According to the technological modes of RPI 6.1-00 “Preparation of Frame Saws” to ensure the required accuracy of wood sawing, the initial stiffness of the strip saw should be at least 60–70 N/mm. The obtained results allow us to determine the main parameters of unstretched strip saws providing this condition.

For citation: Prokofiev G.F., Tyurin A.M., Kabakova M.Yu., Kovalenko O.L. Determination of the Initial Stiffness of Unstretched Rolled Strip Saws. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 143–150. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-143-150

Keywords: accuracy of wood sawing, initial stiffness of strip saws, conditions for precise sawing, guides for saws, stress condition when rolling.

Поступила 21.03.19 / Received on March 21, 2019

УДК 674.817

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-151-158

**ВОДОСТОЙКОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ ПЛИТ,
ПОЛУЧАЕМЫХ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЯЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ****В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>**М.А. Баяндин, канд. техн. наук, доц.;** *ResearcherID:* [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>**С.Н. Казицин, канд. техн. наук;** *ResearcherID:* [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4220-5488>**А.В. Намятов, ассистент;** *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>**В.А. Острякова, ст. лаборант;** *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1666-0324>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; e-mail: vnermolin@yandex.ru, mihaibayandin@yandex.ru, sergeikaz060890@yandex.ru, namyatov2010@yandex.ru

Исследована водостойкость плит средней плотности, полученных из гидродинамически обработанных древесных опилок без применения связующих веществ. В качестве критериев водостойкости принято использовать разбухание плит по толщине после вымачивания в воде в течение 24 ч и остаточную прочность при статическом изгибе. Изучено влияние следующих режимных факторов горячего прессования на водостойкость плит: температуры плит пресса, удельной продолжительности прессования, влажности пресс-массы. Установлено, что при увеличении температуры плит пресса и удельной продолжительности прессования разбухание плит по толщине снижается. Наименьшее значение этого показателя отмечено при влажности пресс-массы 210 %. Для сравнения исследовано влияние кипячения в воде в течение одного 1 ч на свойства плит из механоактивированных древесных частиц, а также древесно-стружечных плит (ДСтП), древесно-волоконистых плит высокой (HDF) и средней (MDF) плотности сухого способа производства. Плиты ДСтП и MDF полностью разрушились, плиты HDF сохранили свою форму, но при этом потеряли прочность при статическом изгибе, которая составила 89,7 % от первоначальной. У плит из механоактивированных древесных частиц потеря прочности при статическом изгибе – 18,2 % от первоначальной (до кипячения – 22,4 МПа, после него – 17,4 МПа). Циклические испытания по ГОСТ Р 56309–2014 методом «вымачивание–замораживание–высушивание» позволили установить, что влажностные деформации плит из механоактивированных древесных частиц имеют обратимый характер. В результате проведения 3 циклов испытаний снижение прочности плит при статическом изгибе составило 29,2 %. При этом геометрические размеры существенно не изменились, остаточное разбухание плит по толщине 0,62 %. Таким образом, предварительная гидродинамическая обработка отходов деревообработки (опилок) позволяет получить экологически чистые плиты с постоянной водостойкостью, которые могут найти широкое применение в жестких температурно-влажностных условиях эксплуатации.

Для цитирования: Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казицин С.Н., Намятов А.В., Острякова В.А. Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 151–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-151-158

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, краевого фонда науки в рамках научного проекта «Иссле-

дование процессов структурообразования материалов из кавитационно-активированной древесины».

Ключевые слова: механоактивация, водостойкость, разбухание, древесные плиты без связующих веществ, гидродинамическая обработка, аутогезия.

Введение

Древесные плиты находят широкое применение во многих отраслях промышленности, но есть сферы, где их использование ограничено. Это относится к случаям, когда плиты эксплуатируются в жестких температурно-влажностных условиях гигроскопического или капельного увлажнения, при низких и высоких температурах. В результате чего, они разбухают, коробятся, теряют прочность [11, 19, 20]. Общим комплексным показателем, характеризующим способность плит сопротивляться этим факторам, является водостойкость, которую принято подразделять на временную и постоянную [3, 6]. Повышение водостойкости позволит значительно расширить область применения древесных плит (животноводческие помещения, наружная отделка, опалубка, тара для овощей и фруктов и др.). Поэтому решение данного вопроса имеет большое научное и практическое значение.

Известно, что формирование большинства древесных плит (древесно-стружечных – ДСтП; ориентированно-стружечных – ОСП; древесно-волоконистых средней плотности сухого способа производства – MDF) обусловлено точечным склеиванием древесных частиц с помощью адгезива в процессе горячего прессования [8, 13]. Как правило, мероприятия, направленные на снижение разбухания и сохранение остаточной прочности при температурно-влажностных воздействиях, имеют временный эффект (временная водостойкость) [11, 12]. Введение гидрофобизаторов при изготовлении плит позволяет уменьшить скорость проникновения воды в древесные частицы и, соответственно, увеличить продолжительность процесса разбухания плит [10, 15]. Аналогичный эффект наблюдается при повышении расхода связующего. Использование фенолоформальдегидных и полидифенилметандиизоцианатных смол обеспечивает более высокую прочность точечных контактов, что дает положительный эффект при кратковременном воздействии влаги [6, 7]. Однако при высоких амплитудах колебаний температуры и прямом контакте с водой прочность плит снижается. При этом существенно увеличиваются размеры плит, что обусловлено давлением набухания клеточной стенки древесины, которое, по мнению Б.С. Чудинова [5], составляет не менее 100 МПа. В результате возникает напряжение на границе «адгезив–древесина», которое приводит к частичному или полному разрушению клеевых контактов, возрастанию разбухания и снижению прочности плит. Поэтому поиск путей повышения водостойкости плит в этом направлении неперспективен. Бóльший интерес представляет обеспечение постоянной водостойкости за счет изменения физических принципов формирования структуры плит.

Структурообразование материала при производстве древесноволокнистых плит во многом определяется межволоконным (аутогезионным) взаимодействием, в меньшей степени – связующим [12, 20]. Водостойкость таких плит обусловлена количеством связей между реакционноспособными группами, ко-

торые образуются за счет фибриллирования частиц на стадии размола [1, 4]. Этот процесс заключается в ослаблении и разрушении связей между отдельными фибриллами клеточной стенки под влиянием механических воздействий и проникновения воды в межфибриллярные пространства [16, 18]. При удалении воды в ходе пьезотермического воздействия полярные гидроксилы связывают макромолекулы волокна между собой, что является причиной образования структуры волокнистого материала [1, 14]. Для повышения водостойкости таких плит производят дополнительную термообработку, что приводит к появлению большего количества связей между реакционными группами компонентов древесины. При этом происходит изменение капиллярной структуры плит. Так, в работе [17] отмечается сокращение объема капилляров размером менее 10 нм. Это уменьшает возможность проникновения молекул воды и их сорбции компонентами древесинного вещества, что снижает разбухание плит. Можно предположить, что придание плитам постоянной водостойкости может быть обеспечено за счет увеличения аутогезинного взаимодействия между древесными частицами.

Данные, полученные нами ранее [2], указывают на возможность изготовления плит без использования связующих веществ. При этом установлено, что обработка опилок гидродинамическим способом (механоактивация) и их последующее горячее прессование позволяют получать плиты с минимальным разбуханием без операции дополнительного термического воздействия и добавления гидрофобизаторов. В целях определения параметров водостойкости древесных плит нами проведены специальные исследования.

Объекты и методы исследования

Как показал анализ работ [1, 4], для получения древесной массы с высокой степенью фибриллирования и минимальным укорочением волокон необходим безножевой размол в водной среде. Для этого использовался аппарат роторно-пульсационного типа оригинальной конструкции. Процесс осуществлялся по методике, подробно изложенной в работе [9]. Обработанные в гидродинамическом диспергаторе опилки с помолом 650 ШР обезвоживались в 2 этапа. На первом этапе суспензия в количестве, необходимом для изготовления образцов по установленной методике, помещалась в ящик, дном которого служила сетка с размером ячеек 0,25 мм. Под действием силы тяжести вода удалялась через сетку и влажность массы снижалась на 40...60 % от первоначальной. Второй этап обезвоживания и формирование ковра происходили на сетке с размером ячеек 1 мм за счет отжима в гидравлическом прессе. После формирования ковер подвергался горячему прессованию, которое осуществлялось на металлических поддонах с дистанционными планками. Все экспериментальные запрессовки плит с размерами 300×300×8 мм и плотностью 880 кг/м³ проводились на лабораторном гидравлическом прессе марки LabPro 1000 (фирма «FontunePresses»).

Для установления возможности изменения водостойкости плит за счет режимных параметров прессования проведены специальные исследования. В качестве варьируемых факторов приняты: температура плит пресса (T) – от 170 до 230 °С; удельная продолжительность прессования (t) – от 2 до 4 мин/мм; влажность ковра перед прессованием (W) – от 110 до 250 %.

После прессования готовые плиты выдерживались при нормальных условиях не менее 24 ч, обрезались по формату и раскраивались на образцы для испытаний размером $100 \times 100 \times 8$ мм. В качестве показателя водостойкости древесных плит принято разбухание по толщине (ΔS , %) после вымачивания в течение 24 ч. Проведены циклические испытания («вымачивание»–«замораживание»–«высушивание») с определением остаточной прочности и разбухания по следующей методике. Образцы выдерживались в воде с pH 7 ± 1 при температуре (20 ± 1) °C в течение (72 ± 1) ч. После этого образцы вынимались из ванны и несколько минут сушились с помощью фильтровальной бумаги. После этого производилось их замораживание при температуре -18 °C в течение 24 ч и сушка в сушильном шкафу при температуре (70 ± 2) °C в течение 70 ч. Эти процедуры выполнялись последовательно 3 раза. Кроме того, определялись разбухание и остаточная прочность образцов после кипячения в воде длительностью 1 ч.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследований получены зависимости разбухания плит от режимных параметров пьезотермического воздействия (рис. 1).

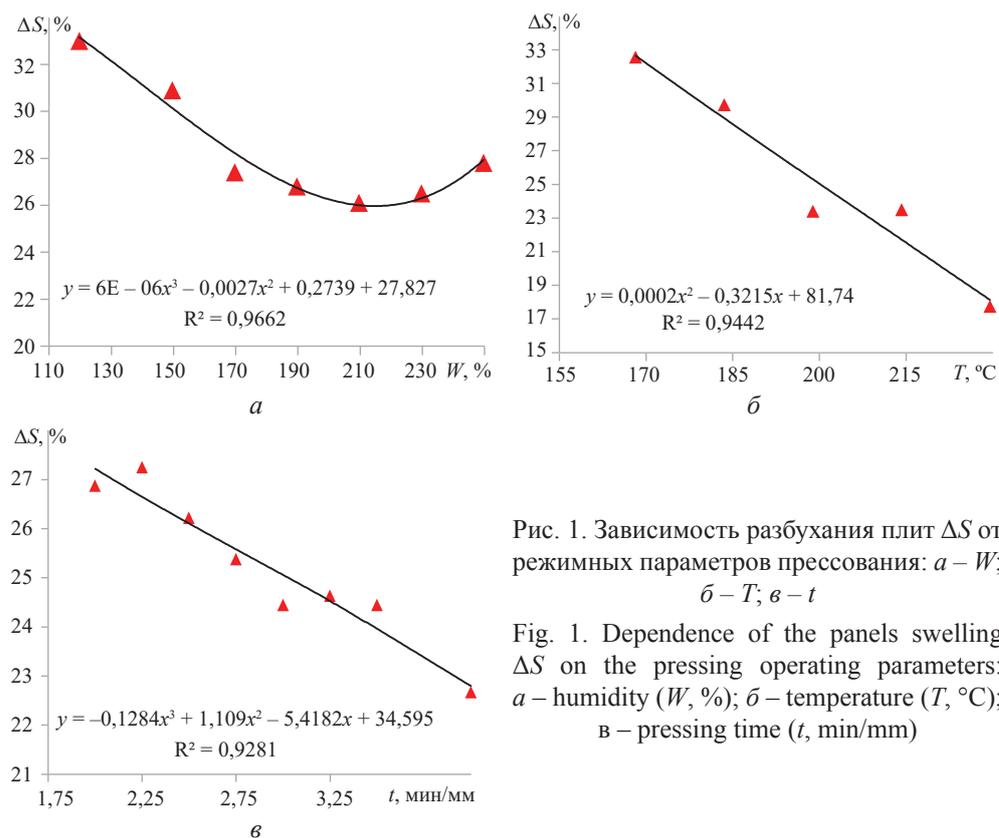


Рис. 1. Зависимость разбухания плит ΔS от режимных параметров прессования: а – W ; б – T ; в – t

Fig. 1. Dependence of the panels swelling ΔS on the pressing operating parameters: а – humidity (W , %); б – temperature (T , °C); в – pressing time (t , min/mm)

Полученные результаты показывают, что величина разбухания плит по толщине существенно зависит от параметров режима прессования. При увеличении влажности пресс-массы выявлено снижение разбухания плит. Минимальное значение этого показателя получено при влажности пресс-массы 210 %. Дальнейшее повышение влажности приводит к росту разбухания плит

(рис. 1, а). При увеличении температуры плит пресса от 170 до 230 °С разбухание снижается (рис. 1, б), достигая минимального значения при максимальной температуре. Повышение продолжительности прессования приводит к снижению разбухания (рис. 1, в).

После определения показателя разбухания и последующего высушивания при температуре 105 °С до влажности 4...6 % у всех образцов устанавливалась остаточная прочность при статическом изгибе. Показано, что плиты сохраняют 95...100 % первоначальной прочности, но у некоторых образцов она увеличивалась более чем на 20 % от первоначальной. Возможно, это обусловлено тем, что при вымачивании и последующей сушке произошла релаксация напряжений, возникших в процессе прессования плит.

Результаты исследования плит, полученных из механоактивированных древесных частиц без связующего методом кипячения в течение 1 ч, представлены в таблице. Для сравнения использовались широко распространенные плитные материалы, произведенные в промышленных условиях: ДСтП, MDF на основе карбамидных смол, сверхтвердые древесноволокнистые плиты мокрого способа производства (HDF).

Показатели свойств плитных материалов после кипячения

Образец	Плотность, кг/м ³	Разбухание по толщине, %	Водопоглощение, %	Потеря прочности при статическом изгибе, %
Плита без связующего	879,8	57,0	114,60	18,2
ДСтП	689,9	93,7	180,60	Разрушение
MDF	760,7	375,0	541,00	Разрушение
HDF	1014,9	60,0	92,27	89,7

Полученные данные указывают на то, что плитные материалы, производимые с использованием связующих на основе карбамидных смол, не выдерживают кипячения в течение 1 ч. Плиты HDF сохраняют целостность, но при этом практически полностью (на 89,7 %) теряют прочность. У плит из механоактивированных древесных частиц отмечена малая потеря прочности при статическом изгибе – 18,2 % от первоначальной (до кипячения – 22,4 МПа, после 17,4 – МПа).

В целях определения влияния переменных температурно-влажностных условий на водостойкость плит из механоактивированных древесных частиц проведены циклические испытания (рис. 2).

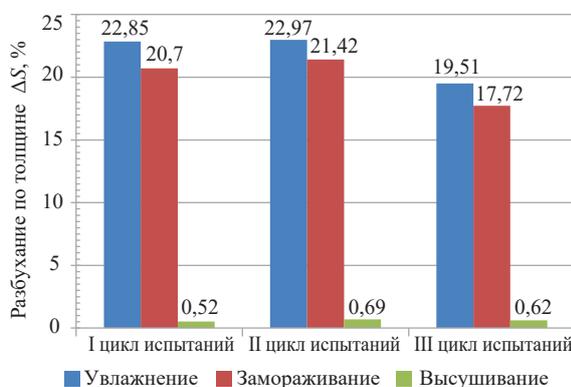


Рис. 2. Разбухание плит из механоактивированных древесных частиц при циклических испытаниях

Fig. 2. Swelling of panels made of mechanically activated wood particles during cycle testing

Полученные результаты указывают на то, что после 3 циклов испытаний размеры образцов практически возвращаются к первоначальным (разбухание плит составляет всего 0,62 %). При этом максимальное значение показателя отмечается на этапах увлажнения (22,97 %), что свидетельствует об обратимости деформации плит из механоактивированных древесных частиц при переменных температурно-влажностных воздействиях.

Исследование прочности на статический изгиб образцов плит, подвергнутых циклическим испытаниям, показало, что данный показатель снижается на 29,2 % и составляет 16,1 МПа.

Выводы

1. Установлено, что перспективным направлением получения плит средней плотности с постоянной водостойкостью является предварительная гидродинамическая обработка мягких отходов деревообработки (опилок), в результате которой создаются условия для формирования структуры плит за счет аутогезионного взаимодействия между древесными частицами. Образовавшиеся связи, имеющие большую энергию взаимодействия, не позволяют плитам разрушаться при увлажнении и замораживании. Сформированная в процессе прессования структура плит способна к большим влажностным деформациям, которые имеют обратимый характер. При этом не происходит существенного изменения их механических свойств.

2. Водостойкость плит можно регулировать технологическими факторами горячего прессования: температурой плит пресса, удельной продолжительностью прессования и влажностью пресс-массы.

3. Гидродинамическая механоактивация позволяет получать из мягких отходов деревообработки (опилок) экологически чистые плиты с постоянной водостойкостью, которые могут найти широкое применение в жестких температурно-влажностных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1986. 45 с. [Alashkevich Yu.D. *Fundamentals of the Theory of Hydrodynamic Treatment of Fibrous Materials in Grinding Machines*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1986. 45 p.].

2. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Казитцин С.Н., Елисейев С.Г. Влияние мелкодисперсных фракций на формирование свойств древесных плит без связующего // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33, № 3-4. С. 182–185. [Bayandin M.A., Ermolin V.N., Kazitsin S.N., Eliseyev S.G. The Influence of Fine Powder Fractions on the Properties Formation of the Wood-Based Panels without a Binder. *Khvoynyye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2015, vol. 33, no. 3-4, pp. 182–185].

3. Леонович А.А. Физико-химические основы образования древесных плит. СПб.: Химиздат, 2003. 192 с. [Leonovich A.A. *Physics and Chemistry of the Wood-Based Panels Formation*. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2003. 192 p.].

4. Смолин А.С., Бисальски М., Шабель С., Шабиев Р.О. Влияние размолла и фракционирования на электроповерхностные свойства целлюлозных гидросуспензий // Химия растительного сырья. 2011. № 3. С. 183–192. [Smolin A.S., Bisal'ski M., Shabel' S., Shabiev P.O. The Influence of Grinding and Fractionation on Electrosuperficial Properties of

Cellulosic Hydrosuspensions. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 3, pp. 183–192].

5. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984. 267 с. [Chudinov B.S. *Water in Wood*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 267 p.]

6. Эльберт А.А. Водостойкость древесностружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 96 с. [Elbert A.A. *Water Resistance of Chipboards*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 96 p.]

7. Chapman K.M. Wood-Based Panels: Particleboard, Fibreboards and Oriented Strand Board. *Primary Wood Processing*. Dordrecht, Springer, 2006, pp. 427–475. DOI: [10.1007/1-4020-4393-7_12](https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7_12)

8. Donaldson L.A., Lomax T.D. Adhesive/Fibre Interaction in Medium Density Fibreboard. *Wood Science and Technology*, 1989, vol. 23, iss. 4, pp. 371–380. DOI: [10.1007/BF00353254](https://doi.org/10.1007/BF00353254)

9. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N. Mechanical Activation of Wood for Adhesive-Free Board Production. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 155, art. 012038. DOI: [10.1088/1757-899X/155/1/012038](https://doi.org/10.1088/1757-899X/155/1/012038)

10. Grigsby W.J., Thumm A. Resin and Wax Distribution and Mobility during Medium Density Fibreboard Manufacture. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, vol. 70, pp. 337–348. DOI: [10.1007/s00107-011-0560-0](https://doi.org/10.1007/s00107-011-0560-0)

11. Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Mai C., Hemmilä V. Effect of Bio-Based Additives on Physico-Mechanical Properties of Medium Density Fibreboards. *Proceedings of the 28th International Conference on Wood Science and Technology 2017: Implementation of Wood Science in Woodworking Sector, Zagreb, Croatia, 7–8 December, 2017*. Zagreb, University of Zagreb, 2017, pp. 153–157.

12. Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Mai C., Taghiyari H.R. Properties of Medium-Density Fibreboards Bonded with Dextrin-Based Wood Adhesive. *Wood Research*, 2019, vol. 64(2), pp. 185–194.

13. Hubbe M.A., Pizzi A., Zhang H., Halis R. Critical Links Governing Performance of Self-Binding and Natural Binders for Hot-Pressed Reconstituted Lignocellulosic Board without Added Formaldehyde: A Review. *BioResources*, 2018, vol. 13, no. 1, pp. 2049–2115. DOI: [10.15376/biores.13.1.Hubbe](https://doi.org/10.15376/biores.13.1.Hubbe)

14. Li J., Yang X., Xiu H., Dong H., Song T., Ma F., Ji Y. Structure and Performance Control of Plant Fiber Based Foam Material by Fibrillation via Refining Treatment. *Industrial Crops and Products*, 2019, vol. 128, pp. 186–193. DOI: [10.1016/j.indcrop.2018.10.085](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.085)

15. Li W., Van den Bulcke J., Dhaene J., Zhan X., Mei C., Acker J.V. Investigating the Interaction between Internal Structural Changes and Water Sorption of MDF and OSB Using X-Ray Computed Tomography. *Wood Science and Technology*, 2018, vol. 52, iss. 3, pp. 701–716. DOI: [10.1007/s00226-018-0992-3](https://doi.org/10.1007/s00226-018-0992-3)

16. Mahrtdt E., van Herwijnen H.W.G., Kantner W., Moser J., Giesswein J., Mitter R., Müller U., Gindl-Altmutter W. Adhesive Distribution Related to Mechanical Performance of High Density Wood Fibre Board. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, vol. 78, pp. 23–27. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2017.06.013](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.06.013)

17. Rowland S.P. *Water in Polymers*. Washington, DC, American Chemical Society, 1980. 597 p. DOI: [10.1021/bk-1980-0127](https://doi.org/10.1021/bk-1980-0127)

18. Salvadó J., Velásquez J.A., Ferrando F. Binderless Fiberboard from Steam Exploded *Miscanthus Sinensis*: Optimization of Pressing and Pretreatment Conditions. *Wood Science and Technology*, 2003, vol. 37, pp. 279–286. DOI: [10.1007/s00226-003-0186-4](https://doi.org/10.1007/s00226-003-0186-4)

19. Suchsland O., Woodson G.E. *Fiberboard – Manufacturing Practices in the United States*. Agriculture Handbook No. 640. USA, USDA Forest Service, 1991. 263 p.

20. Tuntsev D.V., Prosvirnikov D.B., Kozlov R.R. Physical and Chemical Properties of Activated Lignocellulose and Its Areas of Application. *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 779–784. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.284.779](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.779)

WATER RESISTANCE OF WOOD-BASED PANELS MADE WITHOUT BINDERS

V.N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

M.A. Bayandin, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

S.N. Kazitsin, Candidate of Engineering; ResearcherID: [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4220-5488>

A.V. Namyatov, Teaching Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>

V.A. Ostryakova, Senior Laboratory Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1666-0324>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety
“Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk 660037, Russian Federation;

e-mail: vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru, sergeikaz060890@yandex.ru,
namyatov2010@yandex.ru

Water resistance of medium density panels made of hydrodynamically treated sawdust without binders was studied. It is customary to use panel swelling through-thickness after soaking in water for 24 hours and residual strength under static bending as criteria for water resistance. The effect of the following operation conditions of hot pressing on water resistance of panels was studied: temperature of press boards, specific pressing time and molding compound humidity. It is found that an increase in the temperature of press boards and specific pressing time results in a decrease in panel swelling through-thickness. The smallest value of this parameter was recorded at the press pulp humidity of 210 %. In comparison, the effect of boiling in water within 1 hour on the properties of the panels made of mechanically activated wood particles, as well as particle boards, high density fiberboards (HDF) and medium density fiberboards (MDF) of dry process was studied. It was found that the particle boards and medium density fiberboards were completely broken. High density fiberboards retained their shape, but the static bending strength was 89.7 % of the initial one. The panels made of mechanically activated wood particles had the static bending strength loss of 18.2 % of the initial one (before boiling – 22.4 MPa, after boiling – 17.4 MPa). The cyclic tests conducted according to the state standard GOST R 56309–2014 and by the “soaking–freezing–drying” method allowed us to find that the moisture deformations of the panels made of mechanically activated wood particles are reversible. As a result of 3 test cycles, a decrease in the static bending strength of the boards was 29.2 %. At the same time, their dimensions had no considerable changes. The value of residual swelling through-thickness was 0.62 %. The obtained results show that the preliminary hydrodynamic treatment of wood wastes (sawdust) allows making eco-friendly boards that have permanent water resistance. They can become widely used, especially under severe temperature and moisture conditions of operation.

For citation: Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Water Resistance of Wood-Based Panels Made without Binders. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 151–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-151-158

Funding: The research was carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research, the Government of the Krasnoyarsk Krai and the Krasnoyarsk Regional Fund of support scientific and technical activities within the framework of the research project “The Study of the Structuring Processes of the Materials Made of Cavitation-Activated Wood”.

Keywords: mechanical activation, water resistance, swelling, wood-based panels without binders, hydrodynamic treatment, autohesion.

Поступила 20.02.19 / Received on February 20, 2019



УДК 676.084

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-159-168

МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ

*О.С. Бровка, канд. хим. наук, вед. науч. сотр., доц.; ResearcherID: [AAF-5387-2019](https://orcid.org/0000-0002-1961-7831),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-7831>*

*И.А. Паламарчук, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAF-5454-2019](https://orcid.org/0000-0002-2947-1370),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2947-1370>*

*Н.А. Горшкова, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAF-5411-2019](https://orcid.org/0000-0002-2036-2418),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2036-2418>*

*А.Д. Ивахнов, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>*

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000;
e-mail: nat.gorshkova@mail.ru

Предложен синтез новых наноструктурированных металлоуглеродных композитов на основе лигносульфонатов. Получение и изучение их свойств является актуальной задачей современного химического материаловедения ввиду применения материалов на их основе в качестве ионоселективных электродов и электрохимических катодов, электродов суперконденсаторов, магнитных сенсоров, устройств записи и хранения информации, гетерогенных катализаторов. Решающее значение при получении этих композитов приобретает метод синтеза, позволяющий формировать частицы определенной формы и размера, определяющих в дальнейшем свойства композиционного материала (сорбционные, электрохимические, каталитические, магнитные, оптические). Цель исследования – изучение влияния условий синтеза наноструктурированных металлоуглеродных композитов на основе углеродсодержащего органического сырья (лигносульфонатов, хитозана, полиэтиленполиамины) и встроеного металла на структуру и физико-химические характеристики новых материалов. Разработан способ, особенностью которого является коллоидно-химический синтез с последующей карбонизацией, позволяющий получить высокодисперсный композит с развитой микро-мезопористой структурой, удельной поверхностью до 400 м²/г и распределением частиц в узком диапазоне размеров (30...65 нм). Металл связывается с лигносульфонатом натрия (ЛС) на стадии формирования хелатного комплекса, который при взаимной коагуляции с хитозаном (ХТ) или полиэтиленполиамином (ПЭПА) образует нерастворимый в воде полимерный металл-органический комплекс. Степень извлечения ионов Со(II) из водных растворов при формировании металлокомплекса состава ЛС–Со–ХТ составляет 78,6 % при массовом соотношении ЛС и ХТ – 1 : 0,25, а для комплекса ЛС–Со–ПЭПА – 56,3 % при массовом соотношении ЛС и ПЭПА – 1 : 0,1. Проведение центрифугирования, промывки ацетоном и карбонизации позволяет зафиксировать металл в структуре металлоуглеродного композита. Проанализированы условия синтеза: количественное соотношение полимерных компонентов (для системы ЛС : ХТ – 1 : 0,25; для ЛС : ПЭПА – 1 : 0,1); продолжительность формирования хелатного комплекса – 1 ч и металл-органического композита – 1 ч; рН 4–6. Морфология наноструктурированного металлоуглеродного композита изучена методом электронной микроскопии, параметры пористой

структуры – методом низкотемпературной адсорбции азота. Углеродные наноматериалы, полученные при мягких условиях синтеза на основе дешевых природных полимеров, перспективны для применения в качестве эффективных сорбентов и катализаторов, в том числе и для защиты окружающей среды.

Для цитирования: Бровко О.С., Паламарчук И.А., Горшкова Н.А., Ивахнов А.Д. Металлоуглеродные композиты на основе лигносульфонатов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 159–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-159-168

Финансирование: Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН ФНИ 2018–2020 гг. «Физико-химические, генетические и морфологические основы адаптации растительных объектов в условиях изменяющегося климата высоких широт» (№ АААА-А18-118012390231-9) с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» (САФУ) и ЦКП НО «КТ РФ в области экологической безопасности Арктики» (ФГБУН ФИЦКИА РАН).

Ключевые слова: лигносульфонат, хитозан, нанокompозит, углеродный материал, металлокомплекс, полиэтиленполиамин.

Введение

Одно из актуальных направлений в развитии различных отраслей науки и техники – создание новых наноструктурированных металлоуглеродных композитов (НМУК) широкого спектра применения. Изучение особенностей формирования таких материалов, их структурных характеристик и функциональных свойств в зависимости от условий синтеза является важной задачей. Свойства НМУК зависят от дисперсности, структуры, морфологии и химического состава как углеродной матрицы, так и встроенного металла [4]. Интерес к подобным системам связан с проявлением изменяющихся свойства наночастиц металла размерных эффектов – электрохимических, каталитических, магнитных и др. [13, 18, 19, 23]. В современных нанотехнологиях используется достаточно много методов получения НМУК [22, 25], среди которых метод коллоидно-химического осаждения полиэлектролитов (ПЭ) с последующей карбонизацией прост, не требует дорогостоящего оборудования и высоких энергетических затрат, что открывает перспективу коммерческого использования получаемых материалов.

Привлекательность данного метода заключается в возможности получения частиц с контролируруемыми малыми размерами и, как следствие, с особыми свойствами (высокой удельной поверхностью, ажурной морфологией), что позволяет эффективно использовать их в катализе, адсорбционных процессах, электронике, фильтрационных материалах, суперконденсаторах, технологиях хранения и производства электроэнергии [14, 24, 26, 27].

Большинство углеродных материалов получают термической обработкой в инертной среде органического сырья, богатого углеродом. В качестве органических предшественников можно использовать биополимеры: альгинаты, целлюлозу, пектин, хитозан, белки, лигнин и др. [17]. Технические лигнины рассматриваются как ценные вторичные продукты химической переработки древесины на целлюлозно-бумажных (лигносульфонаты (ЛС), щелочной и сульфатный лигнины) и гидролизных (гидролизный лигнин) предприятиях. Особое место занимают ЛС, которые являются побочными продуктами сульфитной (бисульфитной) делигнификации древесины. Наличие сульфогрупп придает ЛС раство-

римность [21], способность к комплексообразованию как с другими ПЭ, так и с ионами металлов в растворах [1, 2, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 17]. В настоящей работе в качестве блокирующих использованы промышленно выпускаемые ПЭ природного (хитозан – ХТ) и синтетического (полиэтиленполиамин – ПЭПА) происхождения, макромолекулы которых содержат катионоактивные аминогруппы, способные к комплексообразованию с сульфогруппами ЛС.

Цель исследования – изучение влияния условий синтеза НМУК на основе углеродсодержащего органического сырья (ЛС, ХТ, ПЭПА) и встроенного металла (Me) на структуру и физико-химические характеристики нового материала.

Объекты и методы исследования

Лигносульфонат натрия получен в результате сульфитной делигнификации древесины ели на АО «Группа «Илим» (г. Коряжма). Очистка от низкомолекулярных примесей проводилась методом ультрафильтрации на лабораторной установке ФМ 02-1000 с перемешиванием. Условия процесса: температура – (20 ± 2) °С; давление в системе – 0,4 МПа; тип мембраны – полисульфоновая ПС-100 [3]. Среднемассовая молекулярная масса (M_w) ЛС, определенная методом гель-проникающей хроматографии на колонке с гелем Молселект М-75 (элюент: буферный 1М раствор с рН 6,2 состава NaCl + 0,0546М Na₂PO₄ + + 0,018М NaOH) [10], составляет 24 кДа.

Хитозан (поставщик – ООО «Биопрогресс», Московская обл.), выделен из панцирей крабов, протонирован в 2 %-й уксусной кислоте. Молекулярная масса (M_n) ХТ, определенная вискозиметрическим методом с расчетом по уравнению Марка–Куна–Хаувинка, $[\eta] = 1,38 \cdot 10^{-4} M^{0,85}$ [20] – 150 кДа.

Полиэтиленполиамин – товарный продукт, полученный согласно ТУ 2413-357-00203447–99. Молекулярная масса ПЭПА определена расчетным методом с использованием гидродинамического инварианта Цветкова–Кленина, диффузии и вязкости. Характеристическая вязкость ПЭПА, измеренная при температуре 25 °С в 0,1 М NaCl, $[\eta] = 5,2 \pm 0,03$ см³/г, что соответствует $M_{Dn} = 5$ кДа.

Композиты состава ЛС–Me–ХТ (ПЭПА) получены последовательным введением водного раствора ЛС в 10 % -й водный раствор соли, содержащий ионы металла (Ni(II), Cu(II), Cu(II)), а затем уксуснокислого раствора ХТ. На первой стадии образуется водорастворимый металлоорганический хелатный комплекс ЛС–Me, на второй стадии (при введении ХТ (ПЭПА) в раствор комплекса ЛС–Me) – нерастворимый металлокомплекс (композит) следующего состава: ЛС–Me–ХТ (ПЭПА), который можно отделить центрифугированием. Блокирующий полиэлектролит (ХТ или ПЭПА) добавляется в реакционную систему при массовом соотношении ЛС : ХТ = 1 : 0,25...0,30 или ЛС : ПЭПА = 1 : 0,1...0,25. Смешивание проводили при комнатной температуре (~22 °С). Полученные водонерастворимые металл-органические комплексы центрифугировали, а в фильтрате титриметрически [7] определяли остаточное содержание металла (никеля, меди и кобальта). Далее водную фазу в структуре композита заменяли на органическую путем многократной промывки до отсутствия следов воды (проба Фишера). В качестве замещающего растворителя был выбран ацетон, который обладает низкой температурой кипения и высоким давлением насыщенных паров, что способствует быстрому освобождению композита от растворителя при комнатной температуре с сохранением текстуры.

Для проведения пиролиза навеска высушенного на воздухе образца (~1 г) вносится в кварцевый стаканчик, который помещается в кварцевую трубку, находящуюся в муфельной печи, оснащенной программатором температуры. После продувки системы инертным газом (азот) в течение 3 мин осуществляется запуск программы подъема температуры. При пиролизе подъем температуры производится со скоростью 1 °С/мин в течение 15 ч до температуры 600 °С, после достижения которой кварцевая трубка вместе со стаканчиком выдвигается из муфельной печи и остывает до комнатной температуры при продувке инертным газом.

Параметры пористой структуры НМУК ЛС–Ме–ХТ (ПЭПА) получены методом низкотемпературной адсорбции азота (77,4 К) на анализаторе удельной поверхности ASAP 2020 MP (фирма «Micromeritics», США). Обработку изотерм проводили с использованием следующих расчетных методов: расчет удельной поверхности – по методу БЭТ; определение площади поверхности микропористого материала – по t-plot методу; оценка объема микропор в присутствии мезопор и распределения микро- и мезопор по размерам – по методу Horvath–Kawazoe.

Снимки образцов получали на сканирующем электронном микроскопе SEM Sigma VP ZEISS (ускоряющее напряжение 10 кВ, детектор InLens). Для повышения контрастности снимков на поверхность образцов с помощью устройства Q150TES (QUORUM) наносили платиново-палладиевое покрытие толщиной до 5 нм.

Результаты исследования и их обсуждение

Лигносulfонат – анионоактивный многофункциональный дендрито-подобный полиэлектролит, содержит карбонильные, гидроксильные (фенольные и спиртовые), карбоксильные и сульфогруппы. Преимуществом разветвленных ПЭ является возможность создания высокой локальной плотности заряда и, соответственно, получения на их основе компактных устойчивых комплексов [17].

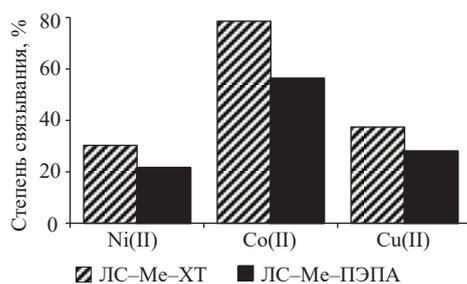


Рис. 1. Степень связывания металлов Ni(II), Co(II) и Cu(II) в полимерный металлокомплекс ЛС–Ме–ХТ (ПЭПА)

Fig. 1. The degree of binding of metals Ni(II), Co(II) and Cu(II) into a polymer-metal complex Lignosulfonate–Metal–Chitosan (ЛС–Ме–ХТ); Lignosulfonate–Metal–Polyethylene Polyamine (ЛС–Ме–ПЭПА)

Известно, что включение некоторых металлов, встроенных в структуру углеродного носителя, влияет на формирование развитой пористой поверхности углеродных материалов. Значительным преимуществом при создании металлоуглеродных композитов является коллоидно-химический подход, который позволяет еще на стадии получения композита внедрить в структуру требуемое количество металла и при последующей высокотемпературной обработке зафиксировать его в структуре углеродного скелета. Наибольшая степень связывания для ряда металлов (рис. 1) в составе металлокомплекса ЛС–Ме–ХТ (ПЭПА) получена для Co(II).

Известно, что на степень связывания биополимеров в комплекс оказывают влияние такие параметры, как соотношение полимерных компонентов (рис. 2), продолжительность формирования полимерного металлокомплекса (рис. 3, *a*) и pH (рис. 3, *b*).

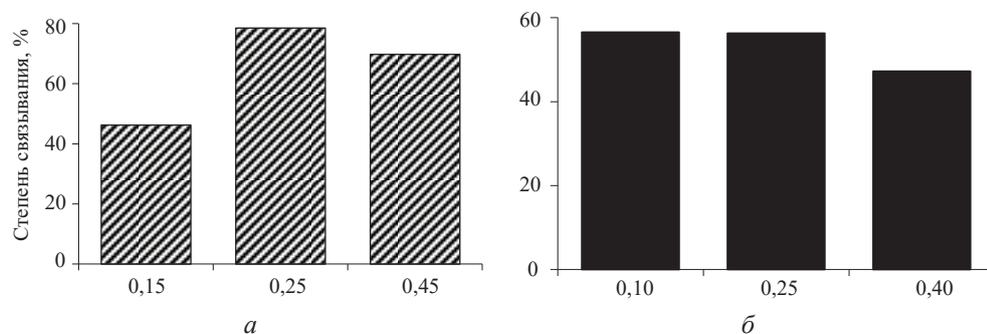


Рис. 2. Зависимость степени связывания Co(II) в полимерный металлокомплекс от соотношения ЛС : ХТ (*a*) и ЛС : ПЭПА (*b*)

Fig. 2. The dependence of the degree of binding of Co(II) into a polymer-metal complex on the ratio of LS : CT (*a*) and LS : PEPA (*b*)

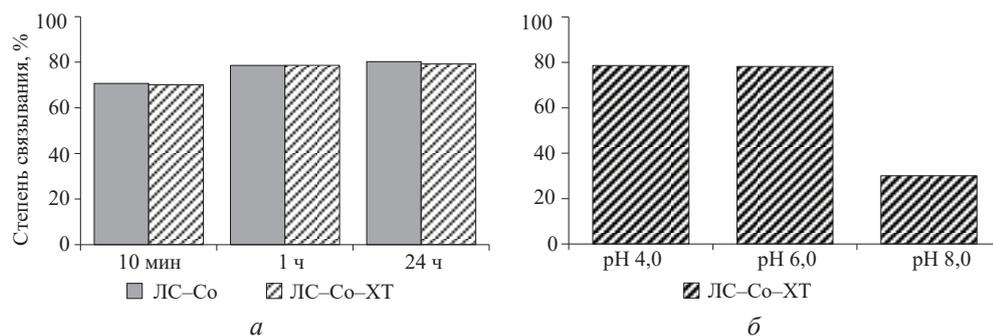


Рис. 3. Зависимость степени связывания Co(II) в полимерный металлокомплекс от продолжительности формирования комплекса (*a*) и pH водной дисперсии комплекса (*b*)

Fig. 3. The dependence of the degree of binding of metals into the complex on the complex formation time (*a*) and pH of the aqueous dispersion of the metal complex (*b*)

Следует отметить, что наибольший эффект связывания металла наблюдается при массовом соотношении ЛС и ХТ = 1 : 0,25. Для металлокомплекса состава ЛС–Со–ХТ степень связывания Co(II) составляет 78,6 %, что на 22,3 % выше, чем у металлокомплекса ЛС–Со–ПЭПА. По-видимому, в процессе взаимной коагуляции водорастворимого хелатного комплекса ЛС–Со и уксуснокислого раствора ХТ последний обладает свойствами флокулянта.

Как видно из рис. 3, *a*, степень связывания Co(II) в хелатный водорастворимый комплекс состава ЛС–Со и нерастворимый полимерный металлокомплекс ЛС–Со–ХТ не изменяется. В течение 1 ч формирование комплекса завершается, далее продолжительность формирования интерполимерного комплекса не оказывает влияния на степень связывания Co(II) в металлокомплекс состава ЛС–Со–ХТ. При увеличении pH водной дисперсии металлокомплекса этого состава степень связывания Co(II) в комплекс снижается, так как разрушаются как ион-ионные взаимодействия ЛС с ХТ, так и взаимодействия Co(II) с гидроксильными фенольными группами ЛС (рис. 3, *b*).

Далее с помощью контролируемого медленного пиролиза из металлокомплексов состава ЛС–Со–ХТ и ЛС–Со–ПЭПА были получены пористые углеродные материалы. Режим пиролиза выбран согласно [15, 16]. По данным электронно-микроскопических исследований углеродные материалы имеют сложную многоуровневую организацию: состоят из хаотически расположенных нанобъектов округлой формы для системы ЛС–Со–ХТ и бесформенных – для ЛС–Со–ПЭПА, собранных в конгломераты различного размера, между которыми просматриваются каверны (пустоты), образуя характерную для данных образцов ажурную морфологию поверхности (рис. 4).

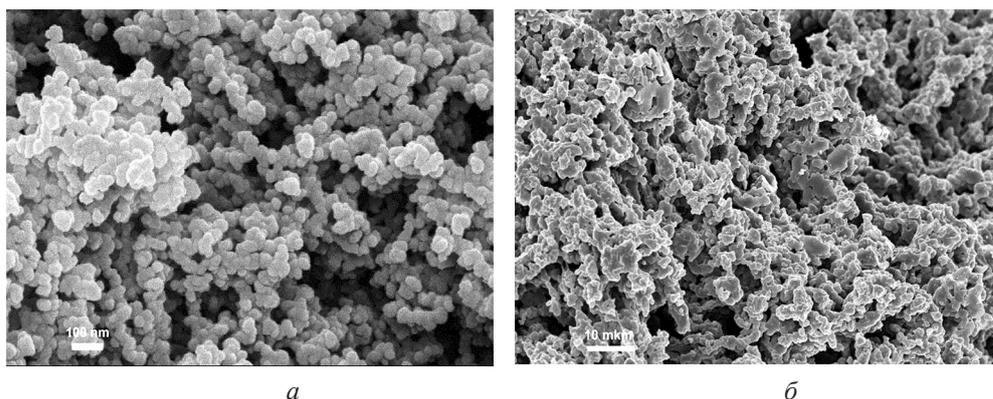


Рис. 4. Электронные микрофотографии карбонизированных металлокомплексов ЛС–Со–ХТ (а) и ЛС–Со–ПЭПА (б)

Fig. 4. Electronic micrographs of carbonized metal complexes LS-Co-CT (a), LS-Co-PEPA (b)

Адсорбционно-структурные исследования показали, что для обоих образцов карбонизированных металлокомплексов характерна развитая микропористая структура (см. таблицу).

Текстурные характеристики образцов металлокомплексов

НМУК	Удельная поверхность, м ² /г		Объем пор, см ³ /г			Средний диаметр пор, нм
	общая	мезопор	общий	микропор	мезопор	
ЛС–Со–ХТ	400	27,2	0,241	0,192	0,041	2,4
ЛС–Со–ПЭПА	321	28,4	0,172	0,151	0,009	2,1

Из полученных результатов видно, что удельная поверхность и суммарный объем пор карбонизованного ЛС–Со–ХТ выше, чем у ЛС–Со–ПЭПА: соответственно 400 м²/г и 0,241 см³/г.

Заключение

Таким образом, предложен синтез новых пористых металлсодержащих углеродных материалов на основе лигносульфонатов. Показана цепь последовательных химических превращений: формирование хелатного комплекса ЛС–Ме, взаимная коагуляция хелатного комплекса с хитозаном (полиэтиленполиамином) и последующий контролируемый пиролиз коагулята.

Данный подход позволяет синтезировать углеродные наноматериалы с развитой микро-мезопористой структурой. Благодаря своим уникальным морфологическим и текстурным характеристикам полученные кобальтсодержащие наноструктурированные металлоуглеродные композиты являются перспективными материалами для сорбционных и каталитических технологий, в том числе для защиты окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бровко О.С., Паламарчук И.А., Вишнякова А.П. Влияние молекулярной массы лигносульфоната натрия на комплексообразование с полиэтиленполиамином // Химия растит. сырья. 2011. № 1. С. 65–70. [Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Vishnyakova A.P. The Effect of the Molecular Weight of Sodium Lignosulfonate on Complex Formation with Polyethylene Polyamine. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 1, pp. 65–70].

2. Бровко О.С., Паламарчук И.А., Сысоева Н.В., Вальчук Н.А., Бойцова Т.А., Боголицын К.Г., Дубовый В.К. Фильтрующие материалы на основе минеральных волокон с биополимерным слоем // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 1. С. 186–194. [Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Sysoeva N.V., Val'chuk N.A., Boytsova T.A., Bogolitsyn K.G., Dubovyy V.K. Filter Materials Based on Mineral Fibers with Biopolymer Layer. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 186–194]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.186](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.186), URL: <http://lesnozhurnal.ru/upload/iblock/e82/brovko.pdf>

3. Вишнякова А.П., Бровко О.С. Применение ультрафильтрации для очистки, концентрирования и фракционирования лигносульфонатов сульфитного щелока // Экология и промышленность России. 2009. № 8. С. 37–39. [Vishnyakova A.P., Brovko O.S. Application of Ultrafiltration for Clearing, Concentration and Fractionating of Lignosulphonates of Sulfite Lye. *Ekologia i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2009, no. 8. pp. 37–39].

4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с. [Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Nauka-Fizmatlit Publ., 2007. 416 p.].

5. Паламарчук И.А., Бровко О.С., Бойцова Т.А., Вишнякова А.П., Макаревич Н.А. Влияние ионной силы раствора на комплексообразование сульфопроизводных биополимера лигнина и хитозана // Химия растит. сырья. 2011. № 2. С. 57–64. [Palamarchuk I.A., Brovko O.S., Boytsova T.A., Vishnyakova A.P., Makarevich N.A. The Ionic Strength Effect of a Solution on the Complex Formation of Sulfonated Biopolymers of Lignin and Chitosan. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 2, pp. 57–64].

6. Паламарчук И.А., Макаревич Н.А., Бровко О.С., Бойцова Т.А., Афанасьев Н.И. Кооперативные взаимодействия в системе лигносульфонат–хитозан // Химия растит. сырья. 2008. № 4. С. 29–34. [Palamarchuk I.A., Makarevich N.A., Brovko O.S., Boytsova T.A., Afanasiev N.I. The Cooperative Interaction in the System of Lignosulfonate – Chitosan. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2008, no. 4, pp. 29–34].

7. Пришибил Р. Комплексоны в химическом анализе / под ред. Ю.Ю. Лурье. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 580 с. [Prshibil R. *Complexones in Chemical Analysis*. Ed. by Yu.Yu. Lur'ye. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1960, 580 p.].

8. Серов В.А., Афанасьев Н.И., Бровко О.С., Засухина Л.В. Извлечение лигнинсодержащих соединений из водных растворов в виде разнолигандных комплексов с переходными металлами // Химия в интересах устойчивого развития. 1997. Т. 5, № 5. С. 613–618. [Serov V.A., Afanas'yev N.I., Brovko O.S. Zasukhina L.V. Extraction of Lignin-Containing Compounds from Aqueous Solutions in the Form of Mixed Ligand Com-

plexes with Transition Metals. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 1997, vol. 5, no. 5, pp. 613–618].

9. Серов В.А., Бровко О.С., Паламарчук И.А. Комплексообразование в системе лигносульфонат натрия – полиэтиленполиамин // Химия в интересах устойчивого развития. 2006. Т. 14, № 5. С. 485–489. [Serov V.A., Brovko O.S., Palamarchuk I.A. Complex Formation in the System Sodium Lignosulphonate – Polyethylenepolyamin. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 2006, vol. 14, no. 5, pp. 485–489].

10. Соколов О.М. Определение молекулярных масс лигнинов на ультрацентрифуге и методом гель-фильтрации. Л.: ЛТА, 1978. 76 с. [Sokolov O.M. *Determination of Molecular Weights of Lignins Using an Ultracentrifuge and by the Gel Filtration Method*. Leningrad, LTA Publ., 1978. 76 p.].

11. Тентерева Г.А., Шавшукова С.Ю., Конесев В.Г. Особенности комплексообразования нейтральных лигносульфонатов с катионами металлов переменной валентности // Башкир. хим. журн. 2017, Т. 24. № 2. С. 66–69. [Teptereva G.A., Shavshukova S.Yu., Konesev V.G. Features of the Complexation of Neutral Lignosulfonates with the Cations of Variable Valency Metals. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir chemistry journal], 2017, vol. 24, no. 2, pp. 66–69].

12. Хабаров Ю.Г., Вешняков В.А., Кузяков Н.Ю. Получение и применение комплексов лигносульфоновых кислот с катионами железа // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 167–187. [Khabarov Yu.G., Veshnyakov V.A., Kuzyakov N.Yu. Preparation and Application of Complexes of Lignosulfonic Acids with Iron Cations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 167–187]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2019.5.167](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.167), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/73e/167_187.pdf

13. Babkin I., Brovko O., Iakovlev M., Khabarov Yu. Ferrofluid Synthesis Using Nitrosated Lignosulfonates. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, vol. 52, no. 23, pp. 7746–7751. DOI: [10.1021/ie400531f](https://doi.org/10.1021/ie400531f)

14. Bhushan B., Luo D., Schricker S.R., Sigmund W., Zauscher S. *Handbook of Nanomaterials Properties*. Berlin, Springer, 2014. 1463 p. DOI: [10.1007/978-3-642-31107-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31107-9)

15. Brovko O., Palamarchuk I., Bogdanovich N., Ivakhnov A., Chukhchin D., Malkov A., Volkov A., Arkhilin M., Gorshkova N. Structure and Electrophysical Properties of Carbogels Based on the Interpolyelectrolyte Complex Lignosulfonate – Chitosan with Various Composition. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, vol. 282, pp. 211–218. DOI: [10.1016/j.micromeso.2019.03.030](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.03.030)

16. Brovko O., Palamarchuk I., Bogolitsyn K., Bogdanovich N., Ivakhnov A., Chukhchin D., Khviuzova K., Valchuk N. Carbon Nanomaterials Based on Interpolyelectrolyte Complex Lignosulfonate Chitosan. *Holzforschung*, 2019, vol. 73, iss. 2, pp. 181–187. DOI: [10.1515/hf-2017-0221](https://doi.org/10.1515/hf-2017-0221)

17. Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A., Bogolitsyn K.G., Valchuk N.A., Chukhchin D.G. Influence of the Conformation of Biopolyelectrolytes on the Morphological Structure of Their Interpolymer Complexes. *Macromolecular Research*, 2015, vol. 23, no. 11, pp. 1059–1067. DOI: [10.1007/s13233-015-3140-z](https://doi.org/10.1007/s13233-015-3140-z)

18. Dzidziguri E.L., Sidorova E.N., Bagdasarova K.A., Zemtsov L.M., Karpacheva G.P. Formation of Co Nanoparticles in Metal-Carbon Composites. *Crystallography Reports*, 2008, vol. 53, pp. 316–319. DOI: [10.1134/S1063774508020223](https://doi.org/10.1134/S1063774508020223)

19. Dzidziguri L., Zemtsov L.M., Karpacheva G.P., Muratov D.G., Sidorova E.N. Preparation and Structure of Metal-Carbon Nanocomposites Cu-C. *Nanotechnologies in Russia*, 2010, vol. 5, pp. 665–668. DOI: [10.1134/S1995078010090119](https://doi.org/10.1134/S1995078010090119)

20. Gamzazade A.I., Šlimak V.M., Skljar A.M., Štykova E.V., Pavlova S.S.A., Rogožen S.V. Investigation of the Hydrodynamic Properties of Chitosan Solutions. *Acta Polymerica*, 1985, vol. 36, iss. 8, pp. 420–424. DOI: [10.1002/actp.1985.010360805](https://doi.org/10.1002/actp.1985.010360805)

21. Gardon J.L., Mason S.G. Physicochemical Studies of Lignosulphonates. II. Behaviour as Polyelectrolytes. *Canadian Journal of Chemistry*, 1955, vol. 33, no. 10, pp. 1491–1501. DOI: [10.1139/v55-182](https://doi.org/10.1139/v55-182)
22. Lu A.-H., Hao G.-P., Sun Q., Zhang X.-Q., Li W.-C. Chemical Synthesis of Carbon Materials with Intriguing Nanostructure and Morphology. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2012, vol. 213, iss. 10-11, pp. 1107–1131. DOI: [10.1002/macp.201100606](https://doi.org/10.1002/macp.201100606)
23. Lu Y., Zhu Z., Liu Z. Carbon-Encapsulated Fe Nanoparticles from Detonation-Induced Pyrolysis of Ferrocene. *Carbon*, 2005, vol. 43, iss. 2, pp. 369–374. DOI: [10.1016/j.carbon.2004.09.020](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.09.020)
24. Rodríguez-Reinoso F. The Role of Carbon Materials in Heterogeneous Catalysis. *Carbon*, 1998, vol. 36, iss. 3, pp. 159–175. DOI: [10.1016/S0008-6223\(97\)00173-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00173-5)
25. Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu., Adejev V.M., Kotko A.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F., Zolotarev A.D. Production of Carbon Nanostructures by Arc Synthesis in the Liquid Phase. *Carbon*, 2007, vol. 45, iss. 6, pp. 1322–1329. DOI: [10.1016/j.carbon.2007.01.017](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.01.017)
26. Velo-Gala I., López-Peñalver J.J., Sánchez-Polo M., Rivera-Utrilla J. Role of Activated Carbon Surface Chemistry in Its Photocatalytic Activity and the Generation of Oxidant Radicals under UV or Solar Radiation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, vol. 207, pp. 412–423. DOI: [10.1016/j.apcatb.2017.02.028](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.028)
27. Yengejeh S.I., Kazemi S.A., Öchsner A. Carbon Nanotubes as Reinforcement in Composites: A Review of the Analytical, Numerical and Experimental Approaches. *Computational Materials Science*, 2017, vol. 136, pp. 85–101. DOI: [10.1016/j.commatsci.2017.04.023](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.04.023)

METAL-CARBON COMPOSITES BASED ON LIGNOSULFONATES

O.S. Brovko, Candidate of Chemistry, Leading Research Scientist, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAF-5387-2019](https://orcid.org/0000-0002-1961-7831), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-7831>

I.A. Palamarchuk, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAF-5454-2019](https://orcid.org/0000-0002-2947-1370), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2947-1370>

N.A. Gorshkova, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAF-5411-2019](https://orcid.org/0000-0002-2036-2418),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2036-2418>

A.D. Ivakhnov, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [U-4822-2019](https://orcid.org/0000-0003-2822-9192), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2822-9192>

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: nat.gorshkova@mail.ru

The synthesis of the new nanostructured metal-carbon composites (NMCC) based on lignosulfonates was proposed. Obtaining and studying the properties of NMCC is a crucial task of modern materials chemistry due to the use of the materials based on them in various fields of science and technology as ion-selective electrodes and electrochemical cathodes, supercapacitors, magnetic sensors, information recording and storage devices, heterogeneous catalysts. The synthesis method, which allows the formation of particles of a certain shape and size, which subsequently determine the properties of the composite material (sorption, electrochemical, catalytic, magnetic and optical), acquires decisive importance in the production of the new materials. The research purpose is to study the influence of the synthesis conditions of NMCC based on carbon-containing organic raw materials (lignosulfonates, chitosan and polyethylene polyamine) and embedded metal on the structure and physico-chemical properties of the new materials. The feature of the developed approach is the colloid-chemical synthesis with subsequent carbonization, which allows to obtain a highly dispersed NMCC

with the developed micro- and mesoporous structure, specific surface area up to 400 m²/g and a narrow particle size (30–65 nm) distribution. Metal binds to sodium lignosulfonate (LS) at the stage of chelate complex formation, which upon mutual coagulation with chitosan (CT) or polyethylene polyamine (PEPA) forms a water-insoluble compound (polymer metal-organic complex). The degree of extraction of Co(II) ions from aqueous solutions during the formation of the LS–Co–CT metal complex is 78.6 % (LS : CT mass ratio is 1 : 0.25) and the LS–Co–PEPA complex is 56.3 % (LS : PEPA mass ratio is 1 : 0.1). Centrifugation and washing with acetone followed by carbonization allow the metal to be fixed in the structure of the NMCC. The synthesis conditions, including the quantitative ratio of polymer components (LS : CT – 1 : 0.25 and LS : PEPA – 1 : 0.1), the duration of the formation of the chelate complex (1 h) and the metal-organic composite (1 h) and pH (4–6), were analyzed. The morphology of the NMCC was studied by electron microscopy, and the parameters of the porous structure were found by the method of low-temperature nitrogen adsorption. Carbon nanomaterials based on cheap starting polymers and obtained in the mild synthesis conditions are promising for practical use as effective sorbents and catalysts, as well as for environmental protection.

For citation: Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Gorshkova N.A., Ivakhnov A.D. Metal-Carbon Composites Based on Lignosulfonates. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 159–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-159-168

Funding: The studies were carried in the course of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research within the framework of the Fundamental Research Program 2018–2020 “Physical and Chemical, Genetic and Morphological Fundamental Principles of Adaptation of Plant Objects in a Changing Climate of High Latitudes” (No. AAAA-A18-118012390231-9) using the equipment of the Core facility center “Arktika” (NArFU) and the Core facility center “Critical Technologies of the Russian Federation in the field of Environmental Safety of the Arctic” (FSIARctic RAS).

Keywords: lignosulfonate, chitosan, nanocomposite, carbon material, metal complex, polyethylene polyamine.

Поступила 27.12.19 / Received on December 27, 2019

УДК 630*867.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-169-175

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕРЕЗОВОГО АКТИВНОГО УГЛЯ ДЛЯ ДООЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Ю.Л. Юрьев, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAA-8591-2020.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: charekat@mail.ru

Одним из перспективных вариантов переработки лиственной древесины невысокого качества считается ее пиролиз на установках низкой экологической опасности, расположенных рядом с источником сырья. В дальнейшем возможна переработка древесного угля на активные угли различного назначения. Цель исследования – оценить пригодность активного угля, полученного из тонкомерной березовой древесины, для доочистки питьевой воды, а также показать возможность его регенерации. В качестве фильтрующего материала в колонках использовался промышленный активный уголь марки БАУ-А и уголь древесный активный дробленый, полученный путем паровой активации угля из тонкомерной березовой древесины во вращающейся печи с z-образной вставкой. Воду в колонки с активным углем подавали так, чтобы обеспечить продолжительность контакта воды с углем в течение 8, 4 и 2 мин. Через 3 месяца непрерывной работы все угольные фильтры с продолжительностью контакта 8 мин сохраняли сорбционную активность, а фильтры с продолжительностью контакта 4 мин были отработаны на 80 %. Далее испытания по доочистке воды проводились на регенерированных углях. Установлено, что доочистка с применением березового активного угля снижает перманганатную окисляемость воды примерно на 1 мг O₂/дм³. Наиболее приемлемой является продолжительность контакта угольной загрузки с водой, равная 4 мин, уголь после регенерации пригоден к повторному использованию. Показано, что уголь, полученный из тонкомерной березовой древесины при помощи активации в печи с z-образной вставкой, снижает окисляемость воды так же, как и промышленный уголь марки БАУ-А. При этом использование более дешевого сырья (тонкомерной березовой древесины) и проведение активации угля с низким удельным расходом водяного пара (за счет организации пульсирующего давления) уменьшает затраты на изготовление фильтрующего материала и доочистку питьевой воды.

Для цитирования: Юрьев Ю.Л. Получение и использование березового активного угля для доочистки питьевой воды // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 169–175. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-169-175

Ключевые слова: доочистка питьевой воды, окисляемость, сорбция, активный уголь, тонкомерная березовая древесина.

Введение

В последние годы усилился интерес к процессу пиролиза различных материалов растительного происхождения мелких размеров (например, в виде щепы или стружки) [15, 17]. Они чаще всего имеют невысокие потребительские свойства, но могут служить сырьевой базой для получения так называемого биочара – по сути древесного угля [14, 16, 20].

Одним из перспективных вариантов переработки лиственной древесины невысокого качества считается ее пиролиз на установках с низкой экологической опасностью [5, 6], расположенных рядом с источником сырья. При переработке березовой древесины получается уголь стандартного качества [10], который после активации водяным паром имеет хорошо развитую пористую поверхность [4, 13] и пригоден для производства углеродных нанопористых сорбентов. Их производство нарастает темпами, превышающими среднемировые [18, 21].

Весьма перспективным является применение нанопористых углеродных материалов в качестве фильтров для доочистки питьевой воды на адсорбционных установках разной мощности [1, 3, 11, 12, 19]. Изучена эффективность адсорбционной доочистки питьевой воды от хлорсодержащих соединений [9].

Необходимо отметить, что для доочистки питьевой воды можно применять как модифицированный древесный уголь [11], так и порошковые или гранулированные угли различных марок [2], однако выбор технологии очистки зависит от свойств исходной воды [8].

Цель исследования – оценить пригодность активного угля (АУ), полученного из тонкомерной березовой древесины, для доочистки питьевой воды, а также показать возможность его регенерации.

Объекты и методы исследования

Испытания доочистки питьевой воды проводили в течение 8 месяцев на фильтровальной станции г. Екатеринбурга. В качестве фильтрующего материала использовали АУ, полученный путем паровой активации угля из тонкомерной березовой древесины во вращающейся печи с z-образной вставкой [7]. По мере вращения, вставка занимает то горизонтальное, то вертикальное положение (рис. 1).

В горизонтальном положении (рис. 1, а) внутри вставки наблюдается минимальное сопротивление прохождению парогазовой смеси, в вертикальном положении (рис. 1, б) материал перекрывает свободное сечение вставки, создавая гидрозатвор, поэтому образующиеся газы активации создают повышенное (до 7 тыс. Па) давление.

Пульсирующее давление обеспечивается высокой степенью заполнения вставки (30...50 %) и соблюдением отношения длины каждого элемента зига к его диаметру в пределах 1,5–6,5 [7]. В экспериментах (угол между зигами – 90°; угол естественного скоса материала – 15°) это отношение составляло 2,6.

Применение пульсирующего давления и высокий коэффициент заполнения вставки позволяют резко снизить расход пара на активацию угля.

Исходная вода из-под песчаного фильтра через бак постоянного уровня подавалась на 3 пары колонок объемом 400 мл каждая. В паре одну колонку загружали опытным углем, другую – промышленным углем БАУ-А в таком количестве, чтобы обеспечить продолжительность контакта воды с углем в течение 8, 4 и 2 мин соответственно.

АУ из тонкомерной березовой древесины имел зольность 4,2 %, суммарный объем пор – 3,1 см³/г, активность по йоду – 63 %; уголь марки БАУ-А пермского производства – соответственно 5,1 %; 2,8 см³/г и 62 %.

После отработки фильтров угли направляли на регенерацию с применением водяного пара при температуре 850 °С во вращающейся установке, имеющей z-образную вставку. Соотношение пар – отработанный АУ составляло 0,5. Продолжительность процесса регенерации – 0,5 ч.

При проведении испытаний перманганатную окисляемость воды до и после каждого фильтра с углем определяли по методике ГОСТ Р 55684–2013. Фильтрующий материал считали отработанным, если окисляемость воды после фильтра превышала 80 % от исходной. Отработанный уголь регенерировали острым паром и использовали повторно.

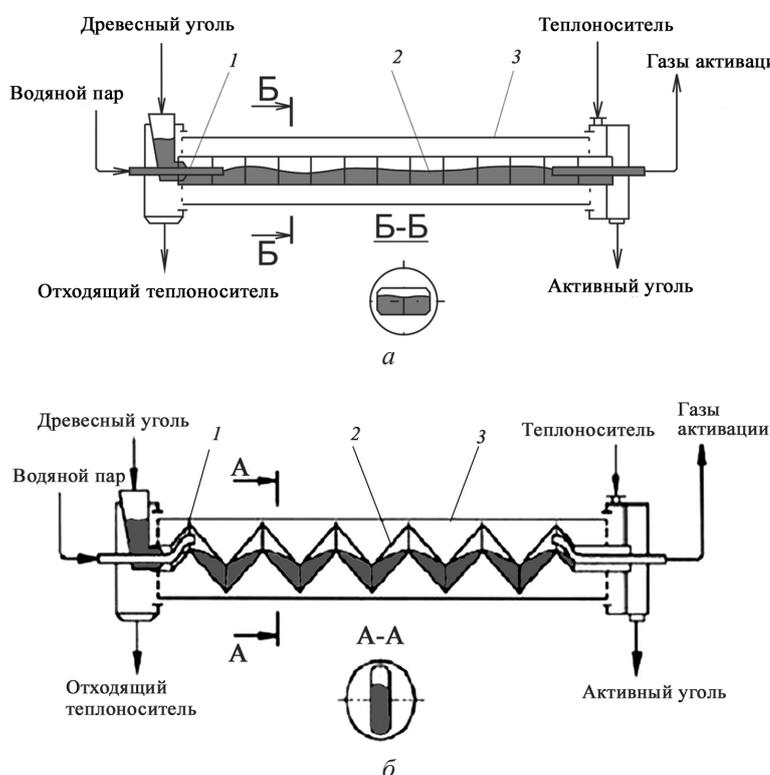


Рис. 1. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) положение z-образной вставки: 1 – форсунка для подачи пара; 2 – зигзагообразная вставка; 3 – барабан

Fig. 1. The horizontal (a) and vertical (б) position of the z-shaped insert: 1 – steam nozzle; 2 – z-shaped insert; 3 – drum

Результаты исследования и их обсуждение

Изменение окисляемости воды после доочистки АУ при разной продолжительности контакта показано на рис. 2, а. Установлено, что при 2-минутном контакте угля с водой через 4 месяца этот уголь терял сорбционную активность.

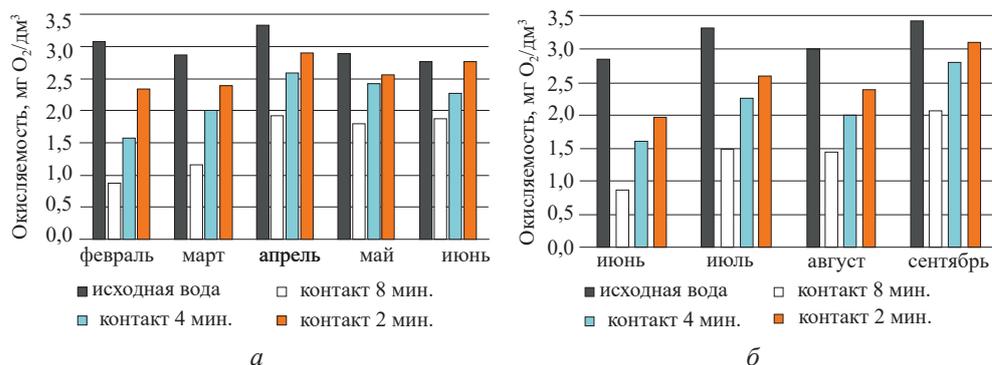


Рис. 2. Окисляемость воды после обработки активным углем до (а) и после (б) регенерации

Fig. 2. Water oxidability after treatment with activated carbon before (a) and after (b) regeneration

Через 3 месяца непрерывной работы все угольные фильтры с продолжительностью контакта 8 мин еще сохраняли сорбционную активность, а фильтры с продолжительностью контакта 4 мин были отработаны на 80 %. Следует отметить, что эффективность очистки воды как промышленным, так и опытным АУ была практически одинаковой. Различие в окисляемости воды на выходе из фильтра с промышленным и опытным АУ не превышало 10 %.

После регенерации АУ имел активность по йоду в пределах 80...83 %, т. е. выше, чем у исходного АУ. Предложенный режим регенерации оказался эффективным за счет короткой продолжительности процесса и низкого удельного расхода пара на активацию.

Далее испытания по доочистке воды проводили на регенерированных углях (рис. 2, б).

Установлено, что АУ при повторном использовании после регенерации позволяет снизить окисляемость воды на 1-2 ед. Однако 2-минутной продолжительности контакта явно недостаточно, а при 8-минутном контакте воды с углем наблюдаются повышенный удельный расход фильтрующего материала и рост затрат на доочистку. Оптимальные результаты получены при продолжительности контакта угля с водой, равной 4 мин.

Проведенный расчет расхода угля для 4-минутной продолжительности контакта АУ с водой показал, что 1 кг угля достаточно для обработки 103 м³ воды.

Выводы

1. Доочистка воды с применением активного угля из тонкомерной березовой древесины снижает окисляемость примерно на 1 мг О₂/дм³. Лучшие результаты достигнуты при 4-минутном контакте угля с очищаемой водой.
2. Уголь из березовой древесины после активации в печи с z-образной вставкой снижает окисляемость воды так же, как и промышленный уголь марки БАУ-А.
3. Уголь после регенерации пригоден к повторному использованию.
4. Использование более дешевого сырья (тонкомерной березовой древесины) и активация угля за счет организации пульсирующего давления при

низком удельном расходе водяного пара сокращают затраты на изготовление фильтрующего материала и доочистку питьевой воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ким А.Н., Романова Ю.В., Грун Н.А. Повышение качества питьевой воды путем совершенствования сорбционной доочистки водопроводной воды // Перспективы развития строительного комплекса. 2015. № S1. С. 316–326. [Kim A.N., Romanova Yu.V., Grun N.A. Improving the Quality of Drinking Water through Development of Sorption Post-Treatment of Tap Water. *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa*, 2015, no. S1, pp. 316–326].

2. Клущин В.Н., Хомутов А.Н., Статиров М.М., Киреев А.С., Мухин В.М. Новые активные угли отечественного производства для водоподготовки и доочистки питьевой воды // Хим. пром-сть сегодня. 2008. № 5. С. 31–41. [Klushin V.N., Khomutov A.N., Statirov M. M., Kireev A.S., Mukhin V.M. New Activated Carbons of Domestic Production for Water Treatment and Drinking Water Post-Treatment. *Khimicheskaya Promyshlennost' segodnya*, 2008, no. 5, pp. 31–41].

3. Королькова С.В. Эколого-гигиеническое обоснование применения и оптимизация автономных адсорбционных устройств для доочистки питьевой воды: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000. 226 с. [Korol'kova S.V. *Environmental and Health Substantiation of Use and Optimization of Autonomous Adsorption Devices for Drinking Water Post-Treatment*: Cand. Eng. Sci. Diss. Saint-Petersburg, 2000. 226 p.].

4. Макаревич Н.А., Богданович Н.И. Теоретические основы адсорбции. Архангельск: САФУ, 2015. 362 с. [Makarevich N.A., Bogdanovich N.I. *The Theoretical Basis of Adsorption*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 362 p.].

5. Патент № 76644 Российская Федерация, МПК C10B 1/04. Реторта / Самойленко С.А., Юрьев Ю.Л., Мехренцев А.В., Жевлаков А.Н. 2008. [Samoylenko S.A., Yur'yev Yu.L., Mekhrentsev A.V., Zhevlakov A.N. *Retort*. Patent RF no. RU 76644 U1, 2008].

6. Патент № 2027735 Российская Федерация, МПК C10B 1/04. Установка для производства древесного угля / Богданович Н.И., Гольверк С.В. 1992. [Bogdanovich N.I., Gol'verk S.V. *Charcoal-Producing Plant*. Patent RF no. RU 2027735 C1, 1992].

7. Патент № 2051097 Российская Федерация, МПК C01B 31/10. Способ активации карбонизованных материалов / Панюта С.А., Юрьев Ю.Л., Стахровская Т.Е., Шишко И.И. 1995. [Panjuta S.A., Jur'yev Ju.L., Stakhrovskaja T.E., Shishko I.I. *Method of Activation of Carbonized Materials*. Patent RF no. RU 2051097 C1, 1995].

8. Первов А.Г. Как выбирать фильтры для очистки воды из водопровода // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2014. № 1(73). С. 42–45. [Pervov A.G. How to Choose Filters for Tap Water. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye*, 2014, no. 1(73), pp. 42–45].

9. Шишкин В.В. Формирование качества питьевой воды путем адсорбционной доочистки от хлорфенола и хлороформа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2009. 22 с. [Shishkin V.V. *The Formation of the Drinking Water Quality by Adsorptive Post-Treatment from Chlorophenol and Chloroform*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Kemerovo, 2009. 22 p.].

10. Юрьев Ю.Л. Свойства угля из тонкомерной березовой древесины // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 1. С. 105–112. [Yuriev Yu.L. Charcoal Properties of Small Size Birch Wood. *Vestnik PNIPIU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology], 2018, no 1, pp. 105–112]. DOI: [10.15593/2224-9400/2018.1.09](https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.1.09)

11. Юрьев Ю.Л., Гиндулин И.К., Дроздова Н.А. Варианты переработки низкосортной древесины на углеродные материалы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 5. С. 139–149. [Yur'ev Yu.L., Gindulin I.K., Drozdova N.A. Options of Low-Grade Wood

Processing into Carbon-Base Materials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 5, pp. 139–149]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.5.139](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.5.139), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/f01/1_YUrev.pdf

12. Юрьев Ю.Л., Дроздова Н.А., Панова Т.М. Доочистка артезианской воды с применением модифицированных древесных углей // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 19. С. 85–86. [Yur'ev Yu.L., Drozdova N.A., Panova T.M. Post-Treatment of Artesian Water Using Modified Charcoals. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2013. T. 16. No 19. S. 85–86].

13. Юрьев Ю.Л., Штеба Т.В. Исследование закономерностей активации углеродной нанопористой матрицы водяным паром // Вестн. Технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 4. С. 194–197. [Yur'ev Yu.L., Shteba T.V. Study of the patterns of activation of carbon nanoporous matrix water vapor. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2015, vol. 18, no. 4, pp. 194–197].

14. Choi Y., Lee J. *Filter System*. Patent US no. US 9889408 B2, 2018.

15. Elliott A.M. *Manufacture of Charcoal*. Patent US no. US 8202400 B2, 2012.

16. Olander M., Piers P., Beierwaltes W.T., Gaspard J.G. *Portable Biochar Kiln*. Patent US no. US 10385274 B2, 2019.

17. *Roskill: Activated Carbon Could See World Consumption Double in Four Years*. Roskill Information Services, 2013. Available at: <https://www.prnewswire.com/news-releases/roskill-activated-carbon-could-see-world-consumption-double-in-four-years-198976641.html> (accessed 09.12.19).

18. Shearer D., Gaunt J., Peacocke V.C. *Biochar*. Patent US no. US 8747797 B2, 2014.

19. Takeda H., Itakura M., Ito M., Yoshinobu H. *Water Filter Cartridge and Water Purifier*. Patent US no. US 10023476 B2, 2018.

20. *United Nations Commodity Trade Statistics Database*. Available at: <https://comtrade.un.org/db/default.aspx> (accessed 09.12.19).

21. Yokoyama K., Fujiwara M., Ueda S., Arai Y., Kudo T., Miyahara S. *Carbonizing Apparatus, Carbonizing System and Carbonizing Method*. Patent US no. US 20080142354 A1, 2008.

PRODUCTION AND USE OF BIRCH ACTIVATED CARBON FOR DRINKING WATER POST-TREATMENT

Yu.L. Yur'ev, Doctor of Engineering, Prof., Head of Department;

ResearcherID: AAA-8591-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: charekat@mail.ru

Pyrolysis of low-quality deciduous wood in the plants with low environmental hazard, located near the source of raw materials is one of the promising options for its processing. In the future, it will be possible to convert such charcoal into activated carbons for various purposes. The research purpose is to evaluate the usefulness of activated carbon derived from small-diameter birch wood for the drinking water post-treatment, as well as to show the possibility of its regeneration. Commercial activated carbon BAU-A and crushed activated charcoal, obtained by steam activation of coal made of small-diameter birch wood in a rotary kiln with a z-shaped insert, were used as a filter medium in the columns. Water was supplied to the columns with activated carbon in such a way as to ensure the contact duration of water with coal for 8, 4, and 2 min. After three months of continuous operation, all carbon filters with 8-minute contact time retained sorption activity, and filters with 4-minute contact time were used for 80 %. Further on, water post-treatment tests were carried out with recovered carbons. It is found that post-treatment using birch activated carbon reduces the water permanganate

oxidation by about 1 mg O₂/dm³. The most complementary preferred contact time of coal charge with water is 4 min. The coal after regeneration is recyclable. It is shown that coal made of small-diameter birch wood using activation in a kiln with a z-shaped insert reduces the water oxidation in the same way as commercial coal BAU-A. Herewith, the use of cheaper raw materials (fine birch wood) and coal activation with low specific consumption of water steam (due to the organization of oscillating pressure) cut costs for the filter medium production and drinking water post-treatment.

For citation: Yur'ev Yu.L. Production and Use of Birch Activated Carbon for Drinking Water Post-Treatment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 3, pp. 169–175. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-169-175

Keywords: drinking water post-treatment, oxidability, sorption, activated carbon, small-diameter birch wood.

Поступила 09.12.19 / Received on December 9, 2019

ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА СТАНИСЛАВОВИЧА МОРОЗОВА



2 мая 2020 г. на 65-м году безвременно ушел из жизни доктор технических наук, профессор, член редколлегии «Лесного журнала», профессор кафедры строительной механики и сопротивления материалов Высшей инженерной школы Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова Морозов Владимир Станиславович.

В.С. Морозов в 1978 г. окончил строительный факультет Архангельского лесотехнического института (АЛТИ) по специальности «Промышленное и гражданское строительство». После окончания института работал научным сотрудником (1978–1983 гг.), ассистентом кафедры основания и фундамента АЛТИ. С 1983 г. по 1993 г. в Северном научно-исследовательском институте промышленности (СевНИИП) старшим научным сотрудником лаборатории дорожных покрытий, заведующим отдела информационных технологий.

В 1992 г. защитил кандидатскую диссертацию «Обоснование и разработка оптимальных конструкций и технологии строительства зимних лесовозных дорог на болотах», в 2002 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук «Разработка научных основ проектирования зимних лесовозных автомобильных дорог на переувлажненных грунтах».

С 1995 г. по 2002 г. доцент кафедры строительной механики и сопротивления материалов Архангельского государственного технического университета (АГТУ).

Владимир Станиславович многие годы участвовал в жизни научного рецензируемого журнала «Лесной журнал», оставив заметный след в повышении научного уровня журнала. Проводил большую работу по подготовке кадров высшей квалификации: был членом диссертационного совета по защитах докторских и кандидатских диссертаций, выступал в качестве оппонента; членом ученого совета, председателем методической комиссии Высшей инженерной школы САФУ.

Морозов В.С. проводил научно-исследовательскую работу по совершенствованию технологии лесозаготовительных производств, лесовозных дорог, опубликовал более 100 научных и учебно-методических работ, успешно руководил аспирантами.

Память о замечательном человеке сохранится многочисленными учениками, продолжающими дело своего наставника, научное наследие Владимира Станиславовича Морозова останется с нами на многие десятилетия.

В.И. Мелехов, Н.А. Бабич, А.Ю. Коновалов, Б.В. Лабудин, А.Ф. Малетина
Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова